

UNIVERSITÉ DE SHERBROOKE  
Faculté de génie

# Gravure de semiconducteurs à large bande interdite III-N pour les transistors Normally-OFF à base de GaN/Algan

**Maîtrise recherche** : génie électrique

Présentée par : **Soundoss Maher**

Maîtrise dirigée par **Hassan Maher**  
**Ali Soltani**

ET codirigé par



# Remerciements

*Les travaux présentés dans cette maîtrise ont été effectués à l'institut interdisciplinaire d'innovation technologique (zit) à Sherbrooke. Ils n'auraient pas pu aboutir sans la collaboration et l'aide de plusieurs personnes que je tiens à remercier ici.*

*Je souhaite remercier Monsieur Maher Hassan et Monsieur Sostani Ali pour leur soutien et leur encadrement tout le long de la maîtrise.*

*Je tiens à remercier également les conseils des post-doctorat, thésards et masters qui sont devenus par la suite des amis : Rodriguez Christophe, Bouchilacun Meriem, Pepin Marie-Clara, Hassan Bilal, et tous les autres que je n'ai pas pu citer.*

*Merci à ma famille mes amis pour le soutien apporté durant cette maîtrise, et surtout pour mes parents qui m'ont encouragé pendant toute la durée de mes études.*

*Enfin, je souhaite un bon courage à tous les thésards et masters du laboratoire qui sont actuellement en préparation de D.P.R.*

*À ma famille, à mes amis*

# TABLE DES MATIÈRES

INTRODUCTION .....	3
DÉFINITION DE PROJET DE RECHERCHE.....	4
<b>2.1 Introduction.....</b>	<b>4</b>
2.1.1. Gravure humide .....	4
2.1.2. Gravure sèche.....	4
2.1.2.1. Description d'un plasma.....	4
2.1.2.1.1. Gravure ionique réactive (Reactive Ion Etching - RIE) .....	5
2.1.2.1.2. Plasma haute densité (HDP).....	5
2.1.2.1.3. Autres réacteurs plasma .....	6
<b>2.2. État de l'art.....</b>	<b>7</b>
2.2.1. Gravure humide de SC III-N .....	7
2.2.2. Gravure sèche de SC III-N .....	8
2.2.2.1. RIE.....	8
2.2.2.1.1. Chimie Chlorée.....	8
2.2.2.1.2. Chimie à base de méthane.....	9
2.2.2.1.3. Autre chimie.....	10
2.2.2.2. ICP-RIE .....	10
2.2.2.2.1. Chimie Chlorée.....	10
2.2.2.2.2. Chimie avec méthane .....	13
2.2.2.2.3. Autre chimie .....	15
<b>2.3. Dommages liés au plasma après gravure.....</b>	<b>5</b>
<b>2.4. Problématique, définition et objectifs du projet de recherche .....</b>	<b>6</b>
<b>2.5. Approche proposée .....</b>	<b>7</b>
DISPOSITIFS EXPÉRIMENTAUX.....	8
<b>3.1. Présentation du réacteur de gravure.....</b>	<b>8</b>
<b>3.2. Les outils de caractérisation .....</b>	<b>9</b>
<b>3.3. Le masque de lithographie .....</b>	<b>10</b>
GRAVURE DE GAN ET DE ALGAN AVEC DIFFÉRENTS PLASMAS .....	11
<b>4.1. Présentation des structures.....</b>	<b>11</b>

<b>4.2. Expériences et résultats.....</b>	<b>12</b>
4.2.1. Plan d'expériences.....	12
4.2.2. Analyse des résultats .....	13
 CONCLUSION.....	 23

# LISTE DES FIGURES

<b>Figure 1</b> : Données mesurées du taux de gravure par cycle pour un temps de plasma $\text{BCl}_3$ fixe et un temps de plasma d'oxygène variable. ....	9
<b>Figure 3</b> : Rugosité Rms en fonction de la puissance de polarisation. ....	11
<b>Figure 2</b> : Effet de la puissance de polarisation sur la vitesse de gravure $\text{Al}_{0.71}\text{Ga}_{0.29}\text{N}$ , $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{N}$ et $\text{AlN}$ . .....	11
<b>Figure 4</b> : Taux de gravure en fonction du rapport $\text{BCl}_3$ . ....	12
<b>Figure 5</b> : Rugosité RMS en fonction de la chimie.....	12
<b>Figure 6</b> : Taux de gravure de $\text{Al}_2\text{O}_3$ pulvérisé avec une concentration variable de $\text{BCl}_3$ . ....	12
<b>Figure 7</b> : Vitesse de gravure de $\text{GaN}$ , $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ et $\text{AlN}$ avec divers débits d' $\text{O}_2$ inférieurs à 40sccm $\text{Cl}_2$ . 10sccm $\text{N}_2$ , une puissance RF de 25W, une puissance ICP de 1750W, et une pression de chambre de 20mTorr.....	13
<b>Figure 8</b> : Taux de gravure pour $\text{GaN}$ , $\text{AlN}$ , $\text{InN}$ , $\text{InGaN}$ et $\text{InAlN}$ en fonction de la polarisation à 500 (haut) et de la puissance ICP de 1000W (bas) dans les plasmas $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$ à 2mTorr.....	14
<b>Figure 9</b> : Taux de gravure pour $\text{GaN}$ , $\text{AlN}$ , $\text{InN}$ , $\text{InGaN}$ et $\text{InAlN}$ en fonction de la puissance ICP à 150 (haut) et 350 W puissance RF (bas) dans les plasmas $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$ à 2mTorr.....	14
<b>Figure 10</b> : Schéma d'une source ICP .....	8
<b>Figure 11</b> : Schéma de principe du microscope à force atomique .....	10
<b>Figure 12</b> : Schéma des <i>structures utilisées</i> : a) $\text{GaN}/\text{Si}$ b) Hétérostructure $\text{AlGaIn}/\text{GaIn}/\text{Si}$ .....	11
<b>Figure 13</b> : Schéma de l'échantillon utilisé pour la gravure de la couche de cap $\text{GaN}$ sur HEMT $\text{GaN}$ : $\text{GaN}/\text{AlGaIn}/\text{GaIn}/\text{Si}$ .....	12
<b>Figure 14</b> : Calibration de la meilleure recette .....	17
<b>Figure 15</b> : La rugosité RMS du $\text{GaN}$ .....	19
<b>Figure 16</b> : La rugosité RMS de l' $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$ .....	19
<b>Figure 17</b> : Calibration de la nouvelle recette optimisée .....	20





# LISTE DES TABLEAUX

<b>Tableau 1:</b> Principaux résultats intéressants pour la gravure du GaN, AlGa <sub>N</sub> et AlN.....	18
<b>Tableau 2:</b> Plan d'expériences .....	13
<b>Tableau 3:</b> Résultats des trois premiers tests .....	14
<b>Tableau 4 :</b> Rugosité de GaN et de AlGa <sub>N</sub> en fonction du flux d'argon. ....	15
<b>Tableau 5:</b> Résultats des quatre tests du plan d'expérience .....	18
<b>Tableau 6:</b> Effet des flux de l'argon et l'azote sur la sélectivité.....	20
<b>Tableau 7 :</b> Effet de la pression sur la sélectivité .....	21
<b>Tableau 8 :</b> Effet de la puissance du platen sur la sélectivité de gravure des III-N.....	22

## Liste des Acronymes

Acronyme	Définition
2DEG	Gaz d'électron bidimensionnel
AlGaN	Nitrure d'aluminium-gallium
AlN	Nitrure de Gallium
CAIBE	Chemically Assiste Ion Beam Etching
ECR	Electron Cyclotron Resonance
ER	Etching Rate
GaN	Nitrure de Gallium
HEMT	Transistor à haute mobilité électronique
ICP	Inductively Coupled Plasma
LP-MOCVD	Low-Pressure Metal-Organic Chemical Vapor Deposition
MBE	Molecular Beam Epitaxy
MESFET	Metal-Semiconductor Field-Effect Transistor
MOCVD	MetalOrganic Chemical Vapour Deposition
MODFET	Modulated-Doping Field Effect Transistor
MOMBE	MetalOrganic Molecular Beam Epitaxy
MOVPE	MetalOrganic Vapour Phase Epitaxy
MRIE	Magnetron Reactive Ion Etching
PECVD	Plasma Enhanced Chemical Vapor Deposition
RF	RadioFréquence
RIBE	Reactive Ion Beam Etching
RIE	Reactive Ion Etching
RMS	Rugosité de surface
RTA	Recuit thermique rapide
SC	Semi-Conducteur
SCCM	Standard Cubic Centimeters per Minut
XPS	X-ray Photoelectron Spectroscopy



# Résumé

Le nitrure de gallium (GaN) est un semi-conducteur à large bande interdite utilisé en optoélectronique et dans les dispositifs de puissance et/ou haute fréquence.

Les matériaux binaires III-N à large bande interdite sont les plus prometteurs pour fabriquer des dispositifs à haute puissance et/ou à haute fréquence pouvant fonctionner à haute température.

Les procédés basés sur les plasmas chlorés sont particulièrement adaptés à la gravure de ces matériaux. Ces derniers présentent une parfaite reproductibilité et permettent une gravure « fine » ou plus ou moins rapide en fonction des exigences sur la qualité de surface recherchée.

Plusieurs exigences doivent être satisfaites pour réaliser la gravure sèche de GaN pour les structures HEMTs communes à base de GaN/AlGaN dans le cadre d'un procédé de fabrication existant : après gravure, i) La rugosité de surface sur la couche barrière AlGaN doit être la plus petite possible ; ii) cette même surface doit présenter un faible endommagement et une faible contamination en impuretés.

L'objectif de ce projet est de trouver un procédé qui respecte les exigences imposées après gravure et qui permet de donner une sélectivité optimale entre le p-GaN par rapport à AlGaN.

**Mots-clés :** GaN, AlGaN, Sélectivité, Plasma, Gravure humide et sèche, RIE-ICP.

# CHAPITRE 1

## INTRODUCTION

La miniaturisation des composants en microélectronique date du début de l'ère de l'électronique à l'état solide. Elle permet de rendre les dispositifs plus compacts, bas coûts et plus respectueux de l'environnement.

Ces technologies de production permettent la fabrication de composants selon les applications envisagées à partir d'une succession d'étapes technologiques (par exemple les dépôts métalliques, de polymères, de matériaux piézoélectriques, de diélectriques, de matériaux semi-conducteurs...). Une de ces étapes est la gravure du matériau, laquelle est obtenue par voie humide et/ou sèche.

Un des outils qui a permis non seulement d'accélérer ce processus mais aussi la réalisation de nouvelles fonctions électroniques, est la gravure plasma. Cette dernière a été utilisée dans un premier temps pour graver le silicium puis les semi-conducteurs III-V GaAs et InP, et enfin les nitrures à large bande interdite III-N.

Dans cette étude, nous nous sommes intéressés à la gravure de matériaux III-N à large bande interdite parce qu'ils sont avec le carbure de silicium, les plus prometteurs pour fabriquer des dispositifs à haute puissance et/ou à haute fréquence pouvant fonctionner à haute température.

Les procédés basés sur les plasmas chlorés sont particulièrement adaptés à la gravure de ces matériaux. Ces derniers présentent une parfaite reproductibilité et permettent une gravure fine ou plus ou moins rapide en fonction de l'état de surface recherché.

Notre challenge consiste donc à graver les matériaux désirés sélectivement et si possible, s'arrêter sur une couche d'arrêt ou de graver finement à l'échelle atomique. Les paramètres d'appoints sont la pression, la puissance, la composition du mélange gazeux, etc...

Dans ce mémoire, nous exposons dans un premier temps les principes généraux de la gravure par plasma, puis passons en revue la littérature scientifique sur ce thème appliquée aux nitrures III-N. Nous abordons alors la problématique et la définition du projet de recherche, la méthodologie employée et l'approche proposée comme solution. Enfin, nous concluons sur les opportunités et les perspectives qu'offre cette étude.

## CHAPITRE 2

# DÉFINITION DE PROJET DE RECHERCHE

## 2.1 Introduction

La gravure permet d'enlever une certaine quantité de matière non protégée par un masque spécifique (généralement de la résine, une couche diélectrique ou une couche métallique). Il existe en général, deux méthodes de gravure: la gravure humide et la gravure sèche.

### 2.1.1. Gravure humide

La gravure humide se fait par attaque chimique à l'aide de solutions liquides qui réagissent avec la matière afin d'en « éliminer » une certaine quantité. Parmi les avantages de cette méthode, on trouve la rapidité du procédé et la génération de moindres défauts. La gravure humide est dans la plupart des cas isotrope et peut causer une sous gravure.

### 2.1.2. Gravure sèche

La gravure sèche ou gravure plasma peut se faire soit par voie physique (pulvérisation) ou par une combinaison de gravure physique et chimique.

L'intérêt recherché de la technique de gravure sèche en micro-nano fabrication concerne principalement l'obtention d'une faible rugosité de surface, un faible endommagement de la surface et une sélectivité de gravure entre deux zones ou deux couches.

#### 2.1.2.1. *Description d'un plasma*

Le plasma est considéré comme le quatrième état de la matière après l'état solide, liquide et gazeux. C'est un gaz partiellement ou totalement ionisé, constitué d'électrons libres, d'ions, de radicaux, d'atomes et de molécules neutres et de photons. Pour générer un plasma, il faut appliquer une décharge électrique suffisante pour ioniser les atomes et les molécules d'un gaz.

Les trois grandes catégories de plasmas sont :

- Les plasmas chauds, totalement ionisés, sont marqués par des températures élevées (MeV) et identiques pour toutes les espèces composant le plasma.

- Les plasmas thermiques sont à l'équilibre thermodynamique ( $T_{ionique} = T_{électronique}$ ). Ils sont utilisés dans des procédés haute pression pour la métallurgie (soudure, découpe), le traitement des déchets par torche plasma ou encore l'éclairage de forte intensité (lampe à arc).
- Les plasmas froids sont faiblement ionisés, ils sont caractérisés par une température électronique élevée (de l'ordre de l'eV), tandis que les ions et les espèces neutres présentent une température proche de l'ambiante.

### 2.1.2.1.1. Gravure ionique réactive (Reactive Ion Etching - RIE)

Dans ce cas, il s'agit essentiellement d'un bombardement ionique anisotrope de type pulvérisation cathodique de la matière avec des ions de haute énergie. Une attaque chimique, spontanée et isotrope, peut se joindre très partiellement en plus de la gravure physique. Le plasma RIE est obtenu sous vide primaire avec une pression de  $10^{-2}$  à  $10^{-1}$  Torr. La vitesse de gravure avec cette technique change en fonction de plusieurs paramètres, la nature des gaz, la pression, la puissance RF....

### 2.1.2.1.2. Plasma haute densité (HDP)

Les plasmas ECR (electron cyclotron resonance), ICP (inductively coupled plasma) et MRIE (magnetron RIE) ont une densité du plasma 2 à 4 fois supérieure à celle d'un plasma RIE. Ils améliorent l'efficacité d'ionisation en favorisant la rupture des liaisons covalentes entre atomes et le pompage des sous-produits de la gravure. De plus, puisque l'énergie et la densité ionique sont découplées, les dommages de surface liés au plasma sont plus aisément contrôlables. Les motifs gravés sont anisotropes et la surface reste stœchiométrique dans une large gamme de conditions plasma. Par rapport à l'ECR, le réacteur ICP a l'avantage d'être plus simple à utiliser en production (grande échelle), l'uniformité du plasma sur de grandes surfaces est meilleure, et le coût de revient est moindre.

#### Paramètres contrôlant la gravure (en HDP)

- Pression: Lorsque la pression augmente, l'efficacité de la source ICP est réduite en raison d'une recombinaison des espèces. Par conséquent, le nombre d'ions traversant la gaine de la cathode est réduit. De plus, si la puissance RF est fixe, l'amplitude de la polarisation continue à augmenter avec l'augmentation de la pression.

À pression élevée, les gravures peuvent être moins anisotropes (sous-gravure / gravure latérale) car le libre parcours moyen des ions est plus faible, les collisions entre les ions sont plus nombreuses.

- Polarisation continue ou *DCbias*: La vitesse de gravure augmente avec la tension de polarisation, donc avec l'énergie des ions. En effet, la désorption des produits de gravure par pulvérisation est améliorée, ce qui favorise la rupture des liaisons entre atomes par bombardement. A plus forte énergie des ions, l'anisotropie est meilleure. Cependant, à très forte énergie des ions, des défauts peuvent apparaître, en particulier lorsque le masque s'érode au cours de la gravure.
- Puissance ICP: Généralement, la vitesse de gravure augmente avec la puissance ICP car le flux d'ions est plus élevé (liaisons plus facilement cassées, désorption par pulvérisation plus efficace), et/ou la concentration d'espèces réactives est plus grande (la composante chimique de la gravure est favorisée).
- Température du substrat: La vitesse de gravure est souvent influencée par la température du substrat qui affecte le taux de désorption des produits de gravure, les cinétiques des réactions entre le plasma et la surface, et la mobilité en surface des espèces réactives. Toutefois, la température est souvent maintenue constante lors du procédé de gravure par un système de refroidissement du substrat.
- Chimie du plasma: Pour les plasmas à base d'halogènes, les vitesses de gravure sont souvent limitées par la volatilité des produits de gravure. Pour les films à base de Gallium ou d'Aluminium, des plasmas à base de chlores fournissent des vitesses de gravure élevées associées à des profils de gravure anisotropes et peu rugueux. Les chimies à base de  $\text{CH}_4/\text{H}_2$  fournissent également des profils anisotropes et peu rugueux pour les films à base de Gallium, avec des vitesses de gravure plus lentes. Selon la source d'espèces réactives associées à l'ajout d'un gaz secondaire dans le plasma, les vitesses de gravure, l'anisotropie, la sélectivité, et la morphologie sont modifiées.

### 2.1.2.1.3. Autres réacteurs plasma

La gravure par faisceau d'ions assistés chimiquement (CAIBE), et la gravure par faisceau d'ions réactifs (RIBE) ont également été utilisés pour graver des matériaux. Les ions sont créés dans une source haute densité et accélérés par des grilles vers le substrat. En CAIBE, les gaz réactifs sont ajoutés dans le plasma sous la grille d'accélération: la composante chimique de la gravure est privilégiée. En RIBE, les gaz réactifs sont introduits dans la source. Ces techniques fonctionnent avec des énergies d'ions élevées (200-2000eV) et à basse pression (< 5mTorr). L'inconvénient majeur de ces techniques est les dommages en surface avec ce type de gravure.



## 2.2. État de l'art sur la gravure des III-V

### 2.2.1. Gravure humide de SC III-N

Dans les conditions normales, seuls KOH et NaOH à des températures supérieures à 250°C peuvent graver le GaN à des vitesses suffisantes. La difficulté pour manipuler ces mélanges et l'incapacité de trouver des masques qui supportent ces chimies ont limité l'utilisation de la gravure humide dans la technologie III-N. Les matériaux GaN, AlN et des alliages associés peuvent être gravés par voie humide avec KOH à des températures de 50-100°C [Vartuli96a]. La gravure anodique (électrochimie) de GaN dans une solution de NaOH a été montrée par Pankove [Pankove72], dans ce cas, le semi-conducteur est oxydé par application d'une tension positive. Minsky et al. [Minsky96] présentent une gravure photoélectrochimique (PEC) de GaN dans une solution de 45% KOH:H<sub>2</sub>O (1:3) ou HCl:H<sub>2</sub>O (1:10) sous illumination laser HeCd (4,5 mW). La vitesse de gravure est de l'ordre de quelques 100 Å/min avec HCl, et quelques 1000 Å/min avec KOH. Les trous générés par la lumière assistent l'oxydation de Ga et donc sa dissolution dans la solution. Des couches de GaN dopées de type n et Al<sub>0.30</sub>Ga<sub>0.70</sub>N sont gravées par électrochimie sous irradiation UV (285 nm). Ces matériaux jouent le rôle d'anode, le nickel jouant celui de la cathode. La solution consiste en 5g de KOH dans 200cl d'eau désionisée. Le contour de GaN est couvert d'Ag pour que le courant circule à la surface de l'échantillon. Pour un courant de <0,1 A.cm<sup>-2</sup>, ER(GaN)=5 nm/min, pour 0,2 A.cm<sup>-2</sup>, ER(GaN)=20 nm/min. Après gravure, la surface est peu rugueuse. Sans irradiation UV, la gravure est possible avec des vitesses inférieures à 30% (avec des motifs de 100 µm de large sur 600 nm de profondeur). Cependant, il y a une possibilité de formation de bulles en surface au cours de la gravure, lesquelles favorisent l'oxydation de Ga ou Al et ralentissent la gravure. A forte concentration de KOH (0,04 M) et une intensité de 60 mW/cm<sup>2</sup> à 365 nm, la gravure devient très rapide avec 500 nm/min. A faible concentration de KOH (0,01 M) et une intensité jusqu'à 5 mW/cm<sup>2</sup>, des tranchées profondes sont rapidement générées à proximité du masque. A plus forte intensité, la formation de tranchées est progressivement réduite. A 0,01 M KOH + 10 mW/cm<sup>2</sup> (faible rugosité), 5 régimes du photo-courant en fonction du temps est observés : 1/ jusqu'à 250 nm de gravure, la surface est lisse ; 2/ les dislocations commencent à apparaître et le photo-courant augmente ; 3/ le matériau cristallin entre les dislocations se grave, le photo-courant devient constant ; 4/ lorsque le matériau cristallin est totalement gravé, la gravure des dislocations s'opère ; 5/ le substrat est atteint. La gravure de méso est possible avec ce procédé. Pour le recess de grille, seule l'étape 1 (avec un temps court) est à utiliser. A très faible concentration <0,005 M KOH, la vitesse de gravure est réduite, et les surfaces sont moins rugueuses. Un procédé limité par la diffusion fournit des surfaces lisses. Ce régime est obtenu lorsqu'un oxyde de Gallium se forme à l'interface GaN/électrolyte. A faible concentration de KOH (pH<12), la solubilité de l'oxyde de gallium est réduite. Cet oxyde bloque partiellement la gravure de GaN puisque les charges doivent traverser cette barrière. Toutefois, cet oxyde est dommageable pour le composant après sa gravure. Aussi, le retrait de cet oxyde peut se faire par dissolution. Pour des concentrations supérieures à 1,4 M de KOH, la dissolution est accélérée. De plus, ce traitement permet de graver quelques dislocations formées en surface. A forte concentration sous AZ400K (solution à base de KOH:H<sub>2</sub>O (11:3)) 0,34 M, sans polarisation externe et après insolation d'un masque de résine jusqu'à 10 mW/cm<sup>2</sup>, des tranchées profondes apparaissent

près du masque. Loin du masque, la gravure est plus lente d'où la non-uniformité observée. Pour  $10 \text{ mW/cm}^2$ , une rugosité apparaît. A plus forte intensité, la formation des tranchées est réduite, la rugosité devient importante. La surface est en forme de nid d'abeille (honeycomb). A faible concentration AZ400K:H<sub>2</sub>O (1:50), 0,027M: jusqu'à  $6 \text{ mW/cm}^2$ , des tranchées ont tendance à se former, la surface est lisse. A  $10 \text{ mW/cm}^2$ , la vitesse de gravure de GaN est de 20-25nm/min, il n'y a pas de tranchées, la rugosité est de 4nm donc le recess de grille est possible dans ces conditions. [Skriniarova01] [Skriniarova02]

En conséquence, les vitesses de gravure par voie humide dépendent fortement de la qualité du matériau. Par exemple, un matériau AlN de très bonne « qualité » est gravé beaucoup moins vite qu'un matériau de plus faible « qualité ». Le matériau (qualité du cristal, composition, conductivité), la solution, la température pendant la gravure, le fait de mélanger ou non les solutions sont des paramètres qui modifient la vitesse de gravure. La gravure par voie humide est donc difficilement généralisable d'un matériau à l'autre, d'une « qualité » à une autre.

## 2.2.2. Gravure sèche de SC III-N

Dans cette partie, l'état de l'art sur la gravure par plasma de GaN, AlN et AlGaIn est décrit. Deux types de gravure par plasma sont présentés : un plasma basse densité à couplage capacitif - RIE (reactive ion etching) et un plasma haute densité à couplage inductif - ICP (inductively coupled plasma).

### 2.2.2.1. RIE

Des réalisations de composants utilisant les plasmas RIE pour le recess et des études plus fondamentales sur la gravure des III-N en RIE sont présentées avec différentes chimies de plasma : chlore, méthane, ou autre chimie.

#### 2.2.2.1.1. Chimie Chlorée

##### Chimie avec BCl<sub>3</sub>:

Dans le cas d'une gravure RIE d'une couche GaN crûe par MBE, lorsque la pression dans l'enceinte diminue de 100mTorr à 10mTorr, la tension d'auto-polarisation augmente de 40V à 230V. Ceci explique les vitesses de gravure plus élevées obtenues à basse pression par bombardement. Par opposition, en diminuant le débit des gaz, la pression dans l'enceinte augmente et la vitesse de gravure diminue (cf. tableau 1) [Lin94].

##### Chimie avec BCl<sub>3</sub> /O<sub>2</sub>:

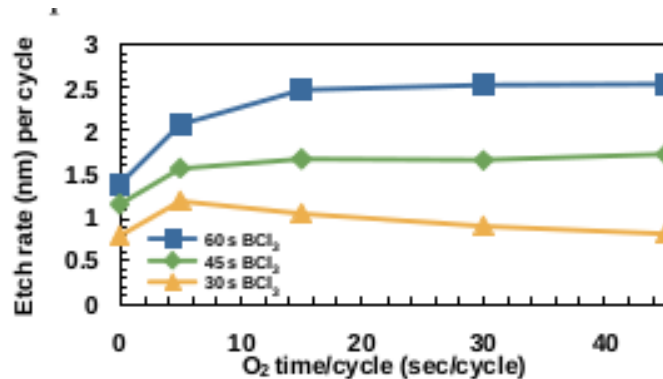
Le principe de cette gravure consiste à oxyder une couche de GaN avec un plasma O<sub>2</sub> suivi de sa gravure par un plasma BCl<sub>3</sub>. Ce procédé constitue un cycle de gravure (digital etching). Si cette opération est répétée plusieurs fois, il est alors possible de graver avec précision des couches plus épaisses. [Burnham.10]

Par exemple :

L'étape d'oxydation est réalisée avec un débit de  $O_2$  de 45 sccm, sous une pression de 100mTorr, une puissance RIE de 50W et une durée variable de 0 à 45s/cycle.

L'étape de gravure est réalisée avec un débit de  $BCl_3$  de 10sccm, sous une pression de 10mTorr, une puissance RIE de 15W et une durée variable de 30 à 60s/cycle.

Pour un temps de gravure de 60 s/cycle, la Figure 1 montre un exemple d'évolution du taux de gravure par cycle par rapport au temps d'oxydation pour un temps de gravure par cycle donné.



**Figure 1 :** Données mesurées du taux de gravure par cycle pour un temps de plasma  $BCl_3$  fixe et un temps de plasma d'oxygène variable.

## 2.2.2.1.2. Chimie à base de méthane

### Chimie avec $CH_4/H_2$ :

La gravure de GaN est réalisée avec un mélange de  $CH_4$  et de  $H_2$  (43nm/min, cf. Tableau 1). Cette chimie fournit des surfaces moins rugueuses sur le fond de gravure et une meilleure anisotropie comparée aux chimies  $HBr$ ,  $SiCl_4/HBr$ ,  $NH_3/CH_4/H_2$ , et  $CH_4/H_2/O_2$ . Toutefois, la gravure sous fort bombardement ionique provoque une érosion des masques [Ribayrol99] [Coquillat98].

### Chimie avec $CH_4/H_2/Ar$ :

Vartuli et *al.* ont réalisé des gravures de GaN et de AlN sous une tension de polarisation de -150V et d'une pression de 1.5mTorr. Ils ont obtenu des vitesses de gravure respectivement de 30nm/min et 5nm/min (cf. Tableau 1). Dans les mêmes conditions plasma mais avec une chimie  $Cl_2/Ar$ , ces matériaux sont gravés respectivement à 120nm/min et 7nm/min [Vartuli96b].

### 2.2.2.1.3. Autre chimie

#### Chimie avec $\text{CHF}_3/\text{O}_2$ :

Après gravure sous  $\text{Cl}_2/\text{CH}_4/\text{Ar}$ , un traitement de surface en  $\text{CHF}_3/\text{O}_2$  est utilisé pour diminuer les dommages liés au plasma de gravure. Dans cette étude, le plasma à base de  $\text{CHF}_3$  est utilisé pour "réparer" la surface. Cependant, il peut être utilisé comme plasma de gravure. Les vitesses de gravure de GaN sont inférieures à 6nm/min (cf. tableau 1). Toutefois, il est probable qu'un oxyde se forme en surface de GaN et que d'autres défauts apparaissent [Qin03] [Chen03].

### 2.2.2.2. ICP-RIE

Les gravures réalisées par plasma ICP-RIE sont utilisées notamment pour former un fossé de grille d'un transistor (recess). Il est présenté dans cette rubrique, un récapitulatif des gravures III-N en RIE-ICP avec différentes chimies de plasma : chlore, méthane, ou autres.

#### 2.2.2.2.1. Chimie Chlorée

##### Chimie avec $\text{Cl}_2$ :

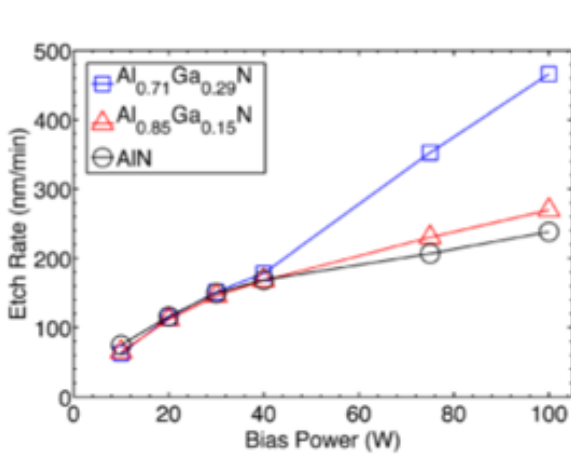
Cho et *al.* étudient la gravure ICP de GaN, AlN, InN, InAlN, InGaN (déposés par MOMBE) en mélange  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$  (10/5sccm). Pour des puissances source RF inférieures à 500W, les vitesses de gravure restent faibles (20nm/min à -100 V, 2mTorr, cf. tableau 1). Au-delà, les vitesses augmentent rapidement car le flux d'ions et la densité atomique en Cl sont plus élevés. Pour des puissances du substrat inférieures à 200 W, la rugosité RMS est environ 10nm (8nm avant gravure). Cette rugosité augmente à plus forte puissance substrat, dû au retrait préférentiel de N par pulvérisation. Toutefois, il faut une énergie suffisante pour initier la gravure en cassant les liaisons de surface III-N [Cho98b]. Les dommages en surface après gravure de GaN en plasma ICP  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$  (60/15sccm) et  $\text{Cl}_2/\text{N}_2$  (60/15sccm) sont étudiés par Han et *al.* par XPS et photoluminescence [Han03].

##### Chimie avec $\text{BCl}_3/\text{Cl}_2/\text{Ar}$ :

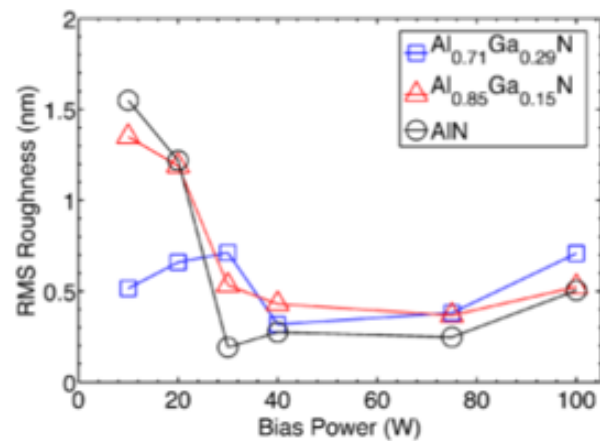
Douglas et *al.* [Douglas.16] ont étudié l'influence de la puissance de polarisation et la composition du plasma sur la gravure de  $\text{Al}_{0.71}\text{Ga}_{0.29}\text{N}$ ,  $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{N}$  et AlN.

➤ Effet de la puissance de polarisation:

Pour évaluer l'effet de la puissance de polarisation sur la vitesse de gravure et la morphologie de surface, la puissance de polarisation est balayée de 10 à 100W pour une pression de la chambre de 3mTorr, une puissance ICP de 125W et un débit des gaz (20%  $\text{BCl}_3$  plus 5sccm Ar à 45sccm de débit total de gaz) maintenu constant. Ces résultats indiquent également que même de petits décalages dans la composition en Aluminium de  $\text{AlGa}_N$ , de  $\text{Al}_{0.17}\text{Ga}_{0.29}\text{N}$  à  $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{N}$ , peuvent provoquer un changement drastique de la vitesse de gravure avec la puissance de polarisation (Fig.2). La rugosité de surface efficace diminue avec l'augmentation de la puissance de polarisation (Fig.3).



**Figure 2:** Effet de la puissance de polarisation sur la vitesse de gravure  $\text{Al}_{0.71}\text{Ga}_{0.29}\text{N}$ ,  $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{N}$  et  $\text{AlN}$ .



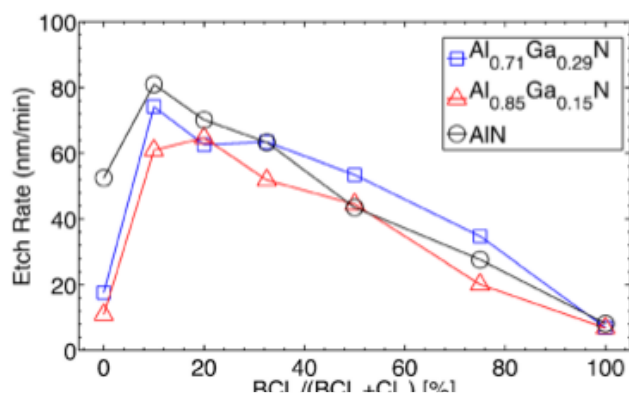
**Figure 3:** Rugosité Rms en fonction de la puissance de polarisation.

➤ Effet de la chimie

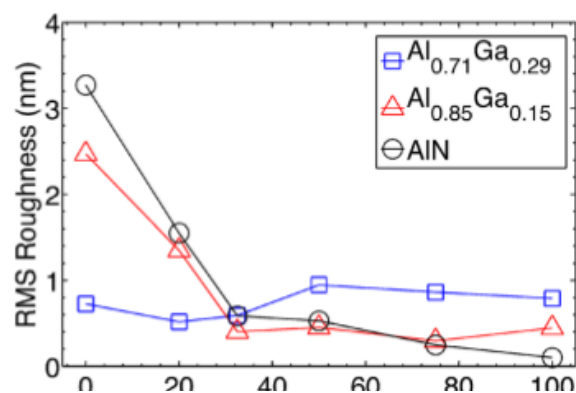
La baisse significative de la vitesse de gravure observée au-delà de 20% du rapport  $\text{BCl}_3/(\text{BCl}_3+\text{Cl}_2)$  est probablement due au fait que  $\text{BCl}_3$  ne produit pas suffisamment de radicaux  $\text{Cl}$ , en particulier à des puissances ICP aussi faibles (cf. Fig.4). En augmentant le rapport  $\text{BCl}_3/(\text{BCl}_3+\text{Cl}_2)$ , la rugosité de surface diminue pour  $\text{Al}_{0.85}\text{Ga}_{0.15}\text{N}$  et  $\text{AlN}$ , par contre elle reste quasiment constante pour  $\text{Al}_{0.71}\text{Ga}_{0.29}\text{N}$  (cf. Fig. 5).

$\text{BCl}_3$  est connu pour son affinité avec l'oxygène, d'où sa réactivité avec ce dernier pour former des espèces volatiles qui peuvent par conséquent être facilement évacuées du réacteur. Ce comportement peut aussi être obtenu avec  $\text{Al}_2\text{O}_3$ . Pour étudier ce concept, une évaluation a été faite sur la vitesse de gravure de l' $\text{Al}_2\text{O}_3$  pulvérisé à 3mTorr de pression, une puissance ICP de 125W, une puissance de polarisation de 10W et un débit des gaz total à 45sccm avec 5sccm d'Argon. Avec un plasma  $\text{Cl}_2$  pur (spécifié ici sous 0% de  $\text{BCl}_3$ ), la vitesse de gravure de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  est

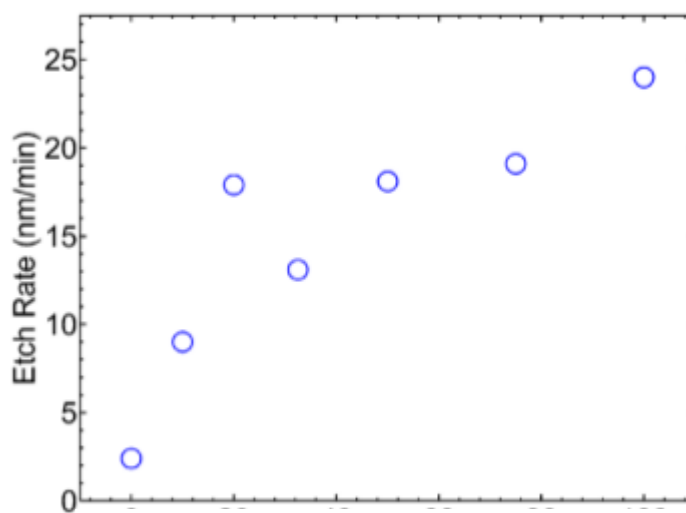
de 2,4nm/min. En ajoutant 10% de  $\text{BCl}_3$ , la vitesse de gravure  $\text{Al}_2\text{O}_3$  est multipliée par quatre à près de 10nm/min et continue son ascension avec l'ajout de  $\text{BCl}_3$ , et atteint 25nm/min pour 100% de  $\text{BCl}_3$  (Fig.6). De plus, un prétraitement au plasma avec 100% de  $\text{BCl}_3$  pendant 60s, a été réalisé sur  $\text{AlN}$  avant la gravure dans 100% de  $\text{Cl}_2$ . Ce prétraitement de 60s a entraîné une augmentation de la vitesse de gravure de 52,5 à 131,5nm/min. Etant donné que la vitesse de gravure de  $\text{AlN}$  dans 100% de  $\text{BCl}_3$  n'est que de 8,7nm/min.



**Figure 4 :** Taux de gravure en fonction du



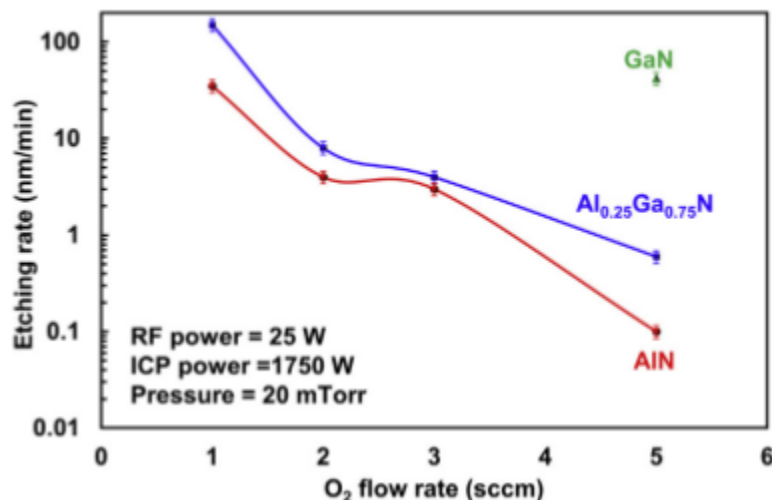
**Figure 5 :** Rugosité RMS en fonction de la chimie.



**Figure 6 :** Taux de gravure de  $\text{Al}_2\text{O}_3$  pulvérisé avec une concentration variable de  $\text{BCl}_3$ .

### Chimie avec $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$ :

La vitesse de gravure de AlGa<sub>0.25</sub>N doit être très faible pour avoir une sélectivité élevée de la gravure de GaN par rapport à AlGa<sub>0.25</sub>N. La puissance ICP est de 1700W, elle est assez élevée pour assurer une ionisation suffisante de l'oxygène. La puissance RF a été diminuée de 35 à 25W pour abaisser l'énergie cinétique des ions afin de ralentir le processus de gravure. La pression de la chambre a été augmentée de 8 à 20mTorr pour raccourcir le libre parcours moyen des ions et supprimer la désorption des produits de gravure. La gravure ICP de AlN et de Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N ralentit considérablement avec le débit croissant de O<sub>2</sub> (Fig.7). Lorsque le débit de O<sub>2</sub> augmente de 1 à 5 sccm, les vitesses de gravure de AlN et Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N baisse de 2-3 ordres de grandeur, ce qui indique que O<sub>2</sub> se traduit par un matériau résistant à la gravure sur la surface. La vitesse de gravure de GaN, Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N, AlN est réduite à 42, 0,6 et 0,1nm/min, respectivement, sous la condition de gravure ICP optimisée de puissance RF/ICP de 25/1750W, une pression de 20mTorr et un mélange de  $\text{Cl}_2/\text{N}_2/\text{O}_2$  de 40/10/5sccm. [Zhong.17]



**Figure 7:** Vitesse de gravure de GaN, Al<sub>0.25</sub>Ga<sub>0.75</sub>N et AlN avec divers débits d'O<sub>2</sub> inférieurs à 40sccm Cl<sub>2</sub>. 10sccm N<sub>2</sub>, une puissance RF de 25W, une puissance ICP de 1750W, et une pression de chambre de 20mTorr.

## 2.2.2.2.2. Chimie avec méthane

### Chimie avec $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$ et $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{N}_2$ :

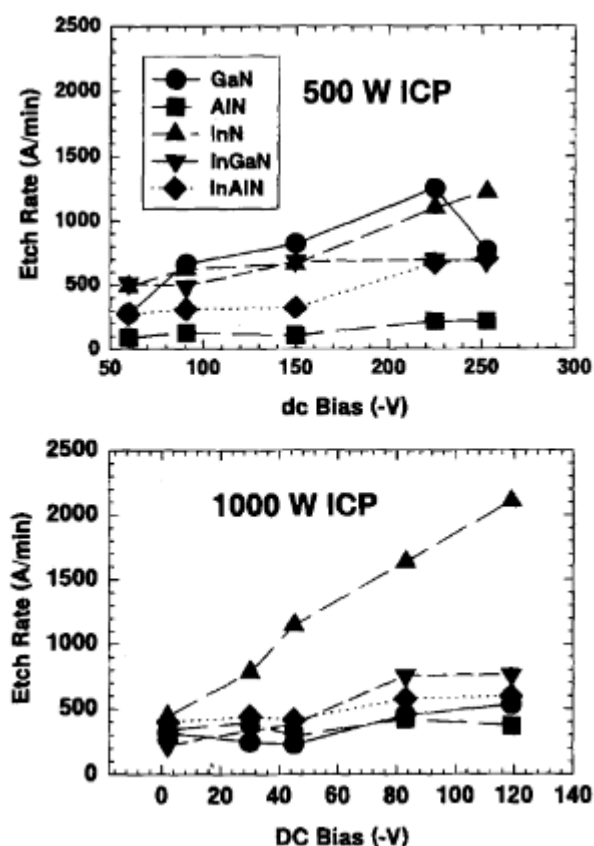
Vartuli et al. présentent les vitesses de gravure de GaN, AlN, InN, InAlN et InGa<sub>0.5</sub>N déposés par MOMBE, avec un plasma de  $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$  et  $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{N}_2$  en fonction de la polarisation (DC), de la puissance ICP et de la pression. Dans le plasma  $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$ , les vitesses de gravure augmentent

avec l'augmentation de la polarisation (-V) pour tous les matériaux étudiés (fig.8). À des valeurs de polarisation similaires, le taux de gravure est en général plus élevé à la puissance ICP de 1000W que dans le cas où la puissance ICP est de 500W.

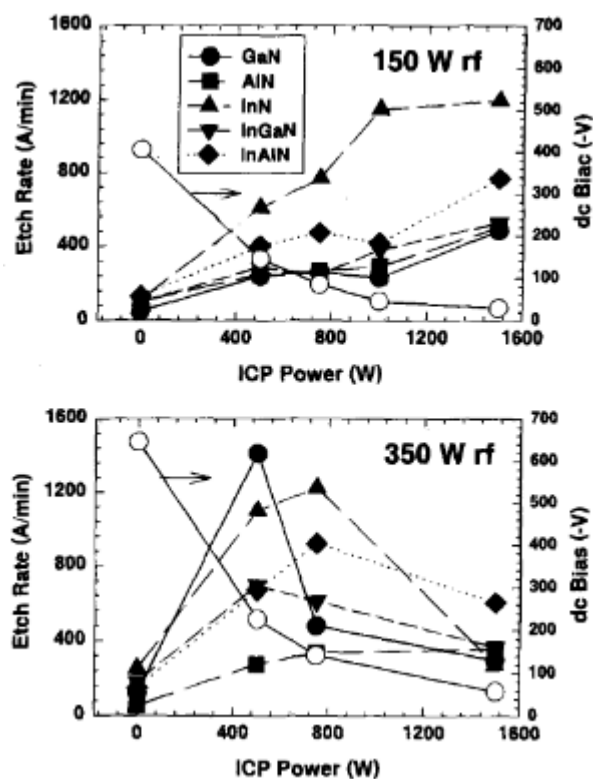
À faible puissance RF (150W), les vitesses de gravure augmentent avec la puissance ICP tandis qu'à 350W, un pic est trouvé entre 500 et 750W de puissance ICP puis le taux de gravure diminue (Fig. 9). Cette chute de la vitesse de gravure peut s'expliquer par le fait que les neutres réactifs ont été éliminés par pulvérisation cathodique avant que la réaction puisse se produire sur la surface du semiconducteur.

La tension de polarisation diminue avec l'augmentation de la puissance ICP et augmente avec l'augmentation de la pression. [Vartuli97b]

Dans le plasma  $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{N}_2$ , les vitesses de gravure étaient environ deux fois plus faibles. Les sélectivités de la gravure étaient généralement faibles autour de 6 dans toutes les conditions pour InN sur GaN, AlN, InGaN et InAlN. Par contre, les surfaces gravées étaient moins rugueuses dans la plupart des conditions.



**Figure 8 :** Taux de gravure pour GaN, AN, InN, InGaN et InAlN en fonction de la polarisation à 500 (haut) et de la puissance ICP de 1000W (bas) dans les plasmas  $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$  à 2mTorr.



**Figure 9 :** Taux de gravure pour GaN, AlN, InN, InGaN et InAlN en fonction de la puissance ICP à 150 (haut) et 350 W puissance RF (bas) dans les plasmas  $\text{CH}_4/\text{H}_2/\text{Ar}$  à 2mTorr.



## 2.2.2.2.3. Autre chimie

### **Chimie avec $\text{SF}_6/\text{N}_2$ :**

Cheung et *al.* comparent la gravure ICP de GaN (cru par MOVPE sur saphir et SiC) entre les chimies  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$  (1:3) et  $\text{SF}_6/\text{N}_2$  (1:1) à débit des gaz constants. Il a été constaté que les vitesses et les rendements de gravure augmentent avec l'auto-polarisation du substrat. Dans le cas du plasma  $\text{SF}_6/\text{N}_2$ , une vitesse de 4nm/min est obtenue à -100V. Avec la chimie  $\text{Cl}_2/\text{Ar}$ , la vitesse de gravure est environ 5 fois plus supérieure à celle qu'avec  $\text{SF}_6/\text{N}_2$ . Il est supposé que la composition chimique de ce plasma serait plus réactive qu'avec  $\text{SF}_6/\text{N}_2$ . Cela est probablement dû à la plus grande volatilité des produits chlorés comparée à leurs congénères fluorés.

Il a été constaté que les dommages détectés, observés à partir de la rugosité de la surface, sont plus marqués après gravure en chimie chlorée pour les mêmes raisons citées précédemment.

[Cheung03].

# CHAPITRE 2

méthode	gaz	débit (sccm)	Puiss (W)	press (mTorr)	Vbias (-V)	ER(GaN) nm/min	ER(AIN) nm/min	ER(AlGaIn) nm/min	références
RIE	O <sub>2</sub> /CHF <sub>3</sub>	x/50	100 à 250	50		< 6	-	-	Qin03
RIE	O <sub>2</sub> /CHF <sub>3</sub>	x/50	100 à 250	25		0,84 à 6	-		Chen03
RIE	Cl <sub>2</sub>	10	15	10			-	1,8 à 3,6	Buttari02
RIE	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub>	5/25	200	40	900V	43	-		Ribayrol99
RIE	SiCl <sub>4</sub>	15	200	50		33			Lin94
	BCl <sub>3</sub>	15	150	50		27			
	BCl <sub>3</sub>	10	150	50		6			
RIE	BCl <sub>3</sub> /SF <sub>6</sub>	40	300	40		10	-	-	Feng96
		20/20	150	100		12			
RIE	Ar/Cl <sub>2</sub> /CH <sub>4</sub> /O <sub>2</sub>	20/150/25/x	50	??		30		5	Wang04
						13		1	
RIE	BCl <sub>3</sub>	10	5	22		-	-	5	Arulkumaran06
RIE	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> /Ar	5/15/10	250	1,5	150V	30	5	-	Vartuli96
ICP-RIE	Cl <sub>2</sub> /Ar	15/5	150	3	-50			4	Kuliev02
ICP-RIE	Cl <sub>2</sub> /Ar	14/6	500	3	50V	~20	-		Khan01
ICP-RIE	Cl <sub>2</sub> /Ar	15/5	300	5	50V	20	-	-	Lee02
ICP-RIE	Cl <sub>2</sub> /Ar	Ar 0-60 Cl <sub>2</sub> 60	100/250/600	5		500 N 330 P	-	-	
	Cl <sub>2</sub> /H <sub>2</sub>	H <sub>2</sub> 0-60				158 N	-	-	

		Cl <sub>2</sub> 60				95 P			
ICP-RIE	CHF <sub>3</sub>		120/75	10		-	-	15	
ICP	Cl <sub>2</sub> /Ar ou BCl <sub>3</sub>	??	600	10 à 30	120V	~50	-	-	Lee98
ICP	Cl <sub>2</sub> /Ar	Tot. 15sccm	750	5	275V	10	10	-	Hahn99
		13/2		5	50w	5	2,5	-	
		13/2	500	5	250w	15	12	-	
ICP	BCl <sub>3</sub> /Ar	10/5	500	2	250V	90	-	-	Maeda99
	BCl <sub>3</sub> /Ar	10/5	500	15	250v	~10			
	BCl <sub>3</sub> /Ar	10/5	1000	2	150W	~10			
	BCl <sub>3</sub> /Ar	10/5	500	2	50W	~20			
ICP	SF <sub>6</sub> /N <sub>2</sub>	Tot.100sccm	1500	10	100V	4	-	-	Cheung03
ICP	N <sub>2</sub> /Cl <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	1/3 3mol%	2000	3	0	32	-	-	Michael07
ICP	Cl <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub>	40/10/5	25/1750	20	100	-80	-0.1	-1	Zhong17
ICP	Cl <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> /Ar	30/2/10	100	5	250			15	Greco17
ICP	Cl <sub>2</sub> /BCl <sub>3</sub> /Ar	20/10/10	200/50	5	70	-0.3	0.15		Haedy17
ICP	Cl <sub>2</sub> /BCl <sub>3</sub> /Ar	-/-/5	125	3		-	-	-	Dougl16
ICP	Cl <sub>2</sub> /Ar	10/5	500	2	100V	20	5	-	Cho98
	Cl <sub>2</sub> /Ar	10/5	750	2	50W	10	7		
	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> /Ar	3/7/5	500	2	50W	30	10		
ICP	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> /Ar	??	500	2	50V	30	10	-	Vartuli97
ECR-RIBE	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> /Ar	5/15/6	200	0,6	300V	30	-	-	Jin02
	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> /Ar/N <sub>2</sub>	5/15/6/6	200	0,6	300V	8			
ECR RIBE	CH <sub>4</sub> /H <sub>2</sub> /Ar/N <sub>2</sub>	5/15/3/3	200	?	300V	11		4	Hasegawa03

## CHAPITRE 2

ECR-RF	$\text{BCl}_3/\text{Ar}$	10/5	200	1	150V	10	2,5	-	Pearson93b
ECR	$\text{CHF}_3/\text{Ar}$	10/5	200	5		-	-	-	Burm97
ALE RIE	$\text{BCL}_3/\text{O}_2$	10/45	50/15	100/10		1.4-2.5	-	-	Burnham10
NB	$\text{Cl}_2$		800	0,09 Pa		-	-	NB10-5 NB2-7,5	Hemmi.17
ALE	$\text{Cl}_2/\text{Ar}$	-/5		60	50-100	0.4 EPC	-	-	Ohba17

**Tableau 1:** Principaux résultats intéressants pour la gravure du GaN, AlGaIn et AlN.

## 2.3. Dommages liés au plasma après gravure

Dans le cas d'une hétérostructure HEMT AlGaIn/GaN traité sous plasma, le bombardement ionique peut entraîner une diminution de la concentration de charges, une diminution de la mobilité dans le canal et par conséquent une augmentation de la résistance carrée. Le fossé de grille (ou recess), obtenu après gravure, détermine également la tension seuil et le courant de fuite du HEMT.

Les dommages liés au plasma peuvent prendre différentes formes :

1/ **Création de défauts cristallins** par les ions, qui se comportent comme des niveaux profonds, ou des centres de recombinaisons dans le matériau. Dû à l'effet de canalisation des ions de faible énergie, et de la diffusion des défauts créés, les effets peuvent être mesurés sur des profondeurs de plusieurs dizaines de nm.

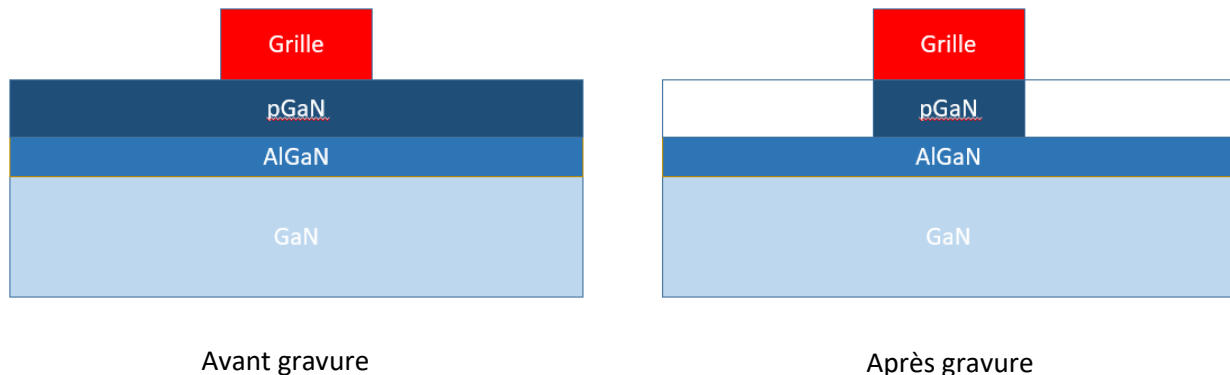
2/ **Passivation non intentionnelle des dopants par les atomes hydrogène** (provenant d'un plasma ou d'une implantation). L'effet de cette activation dépend fortement de la température du substrat, mais peut se produire sur des profondeurs de plusieurs centaines d'Angstrom.

3/ **Dépôt d'un film polymère** lors d'un traitement par plasma impliquant des radicaux  $\text{CH}_x$ , ou lors de réactions entre le masque de résine et un plasma à base de Chlore.

4/ **Création d'une surface non stœchiométrique** dû au retrait préférentiel d'un élément du matériau. Ceci peut apparaître (i) lorsque la volatilité des produits de gravure respectifs est différente, entraînant un enrichissement de la surface en l'élément le moins volatil, ou (ii) par pulvérisation préférentielle de l'élément le plus léger si le mécanisme de gravure implique une forte composante physique. La profondeur d'action typique est inférieure à quelques nm.

## 2.4. Problématique, définition et objectifs du projet de recherche

En raison des nombreuses applications dans les domaines de l'électronique et des capteurs [Pearton06], la gravure sélective de GaN sur AlGaN par ICP ou RIE, a particulièrement intéressée la communauté GaN au cours des dernières décennies. En électronique de puissance, le composant d'intérêt est le transistor Normally-OFF (E-mode) avec une couche p-GaN sous la grille. Cette dernière est gravée sélectivement des zones d'accès pour n'apparaître que sous la grille et former une jonction PN.



Plusieurs exigences doivent être satisfaites pour réaliser cette gravure sèche dans le cadre d'un procédé technologique existant : après gravure, i) La rugosité de surface sur la couche barrière AlGaN doit être la plus petite possible ; ii) cette même surface doit présenter un faible endommagement et une faible contamination en impuretés.

Pour cela, il est nécessaire de contrôler finement la vitesse de gravure et d'avoir une haute sélectivité de pGaN par rapport à AlGaN. Pour se faire, nous avons à disposition une variété de paramètres (chimie du mélange gazeux, puissance ICP, pression de la chambre...) sur la machine III-V du LNN (voir annexe).

La difficulté réside sur la compréhension du ou des mécanismes de gravure, de trouver un compromis entre l'ensemble de ces paramètres, et la chimie spécifique permettant la gravure sélective de p-GaN sur AlGaN.

## 2.5. Approche proposée

Les gaz permettant la gravure de GaN sont tous basés sur une chimie chlorée, mais sous certaines conditions et pour des vitesses de gravure extrêmement faibles, les gaz fluorés ou à base de méthane sont aussi utilisés. Cependant, ces deux derniers cas polluent la surface en éléments fluorés ou carbonés et la chimie chlorée est connue pour sa rapidité de gravure.

Pour réduire celle-ci, nous proposons d'ajouter un élément oxydant tel que  $O_2$  qui pourrait freiner la réactivité du chlore dans la phase gazeuse, mais aussi d'oxyder le gallium ( $GaO_x$ ) et l'aluminium ( $AlO_x$ ). La sélectivité à obtenir est reportée dans ce cas entre les matériaux oxydés  $GaO_x$  et  $AlO_x$ .

## CHAPITRE 3

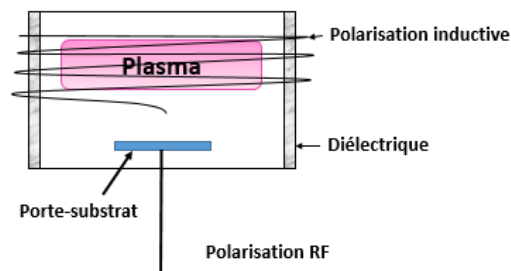
### Dispositifs expérimentaux

Ce chapitre est consacré à la description du dispositif expérimental utilisé dans le cadre de cette maîtrise. La gravure des divers échantillons a été réalisée dans un réacteur ICP qui est le mieux adapté pour graver des matériaux III-V (GaN et AlGaIn). Pour comprendre les mécanismes de gravure des différents procédés de gravure étudiés, nous avons utilisé la microscopie à force atomique (AFM), outil de caractérisation utilisé pour l'analyse de la vitesse de gravure et pour analyser la rugosité des surfaces exposées à différents plasmas de gravure.

#### 3.1. Présentation du réacteur de gravure

Nos études ont été réalisées sur une machine de gravure à couplage inductif (Multiplex Inductively Coupled Plasma (ICP) SR III-V system) installée dans la salle blanche du LNN de l'institut interdisciplinaire d'innovation technologique (3IT).

Dans un bâti ICP, le transfert de la puissance électrique au plasma se fait par couplage inductif au moyen de spires enroulées autour du réacteur et à travers une fenêtre de diélectrique comme représenté sur la Figure 10.



**Figure 10** : Schéma d'une source ICP

Le principe de fonctionnement de ce type de source est le suivant: une antenne séparée du plasma par une paroi diélectrique est alimentée en puissance radiofréquence (RF) via une boîte d'accord en impédance. Le courant RF circulant dans l'antenne induit un champ électromagnétique  $B$  dans le plasma. Les oscillations RF de ce flux magnétique induisent alors un champ électrique oscillant  $E$  dans le plasma. Ce champ électrique induit est relativement faible et permet d'entretenir le plasma, une fois celui-ci amorcé.



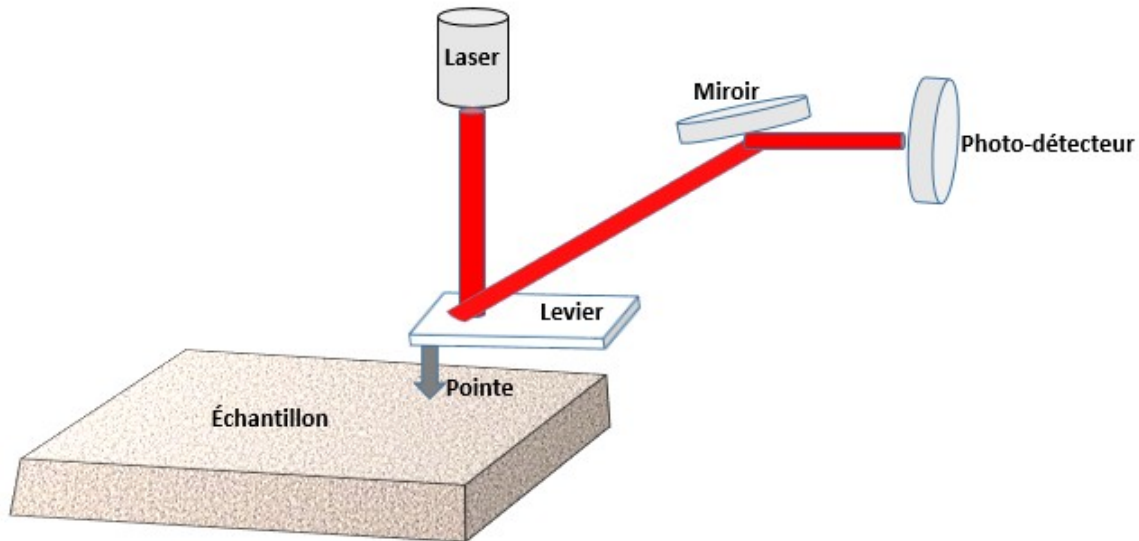
### Les différents paramètres du réacteur

Pour établir nos procédés de gravure à partir du réacteur ICP, nous pouvons jouer sur quatre paramètres : - la puissance source (ICP) injectée dans l'antenne qui contrôle la densité des ions (0 à 1000W) - la puissance de polarisation (aussi appelée « puissance bias ») appliquée au substrat et qui contrôle l'énergie des ions (0 à 20W) - la pression de travail (2 à 10mT) - les gaz injectés et leur débit. Les gaz disponibles sont : Ar, N<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, He, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, SiCl<sub>4</sub>, BCl<sub>3</sub>, SF<sub>6</sub>, et leur injection dans le réacteur est assurée par des contrôleurs de débit massique. Les débits des gaz sont exprimés en sccm (Standard Cubic Centimeter per Minute), soit des cm<sup>3</sup>.min<sup>-1</sup> dans les conditions normales de température et de pression (à 273K et à 1bar, 1sccm = 1,67x10<sup>-8</sup> m<sup>3</sup>/s).

## 3.2. Les outils de caractérisation

La microscopie à force atomique (AFM pour « Atomic Force Microscopy ») est un moyen puissant de caractérisation morphologique des surfaces. Elle permet de quantifier les variations de topographie. Sa résolution est meilleure que le dixième de nanomètre. Son principe repose sur l'interaction des forces atomiques (forces de Van der Waals, forces électrostatiques) entre une micro-pointe et l'échantillon. La surface est balayée par une pointe à faible rayon de courbure. Le contrôle des forces d'interaction pointe-échantillon, associé à une mesure des déplacements de la pointe, permet d'obtenir une cartographie de la topographie de l'échantillon.

L'extrémité de la pointe équivaut à une bille de rayon de courbure <10nm. Elle est placée au bout d'un levier sensible aux interactions atomiques entre la pointe et l'échantillon. L'autre extrémité du levier est fixée sur un tube piézoélectrique qui s'étend ou se rétracte pour conserver le contact avec la surface. La déflexion verticale de la pointe avec la topographie est très faible car les forces détectées sont de l'ordre du nanonewton. Pour quantifier cette déflexion, un faisceau laser est envoyé sur l'extrémité mobile du levier et récupéré après réflexion par un photo détecteur (voir Figure 11). La déviation verticale du faisceau sur le détecteur est directement liée à la topographie de la surface.



**Figure 11** : Schéma de principe du microscope à force atomique

L'AFM offre plusieurs modes de fonctionnement qui lui permettent de s'adapter à toutes sortes d'échantillons : le mode contact, non contact, percussion ou Taping et le mode qui regroupe les deux modes précédents. Nous avons utilisé le mode Taping où le levier bat à une fréquence donnée pendant le balayage. Cela permet de limiter les problèmes engendrés par la présence d'un film d'eau en surface ou par la présence de marches. La précision des déplacements est obtenue par l'utilisation de cylindres piézoélectriques. La précision de mesure est quant à elle directement liée à l'état et à la finesse de la pointe.

Le microscope à force atomique utilisé au cours de ce travail de maîtrise est un Microscope à force atomique (VEECO NanoScope IIIa) et il offre les caractéristiques suivantes :

- Un bruit  $< 0.5 \text{ \AA}$  RMS en dimension verticale (Z) en cas d'utilisation avec un système d'isolation des vibrations en option. (Bruit blanc ambiant de 75 dbc).
- Une précision latérale généralement inférieure à 1%, maximum 2%.
- Une résolution complète de 16 bits sur tous les axes pour toutes les tailles de numérisation et tous les décalages.
- Une zone inspectable sur les axes X-Y est de 100 mm sur 120 mm.
- Une taille d'échantillon  $\leq 200$  mm de diamètre.

### 3.3. Le masque de lithographie

Dans notre procédure de photolithographie, on a opté pour un masque avec un motif composé de lignes de différentes largeurs de 1 $\mu\text{m}$  à 10 $\mu\text{m}$  permettant de remonter à la vitesse de gravure des matériaux désirés.

# CHAPITRE 4

## Gravure de GaN et de AlGaN avec différents plasmas

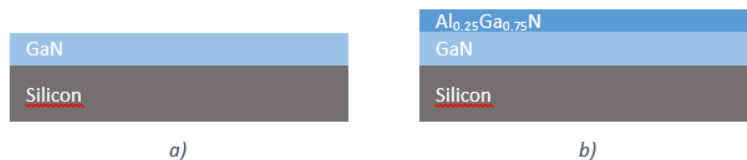
Ce chapitre est consacré à l'impact des plasmas à base de  $\text{Cl}_2$  pour la gravure de GaN et AlGaN. Dans la première partie, nous présentons les structures utilisées pour ces gravures. Dans la seconde partie, nous définissons un plan d'expérience pour atteindre nos objectifs.

Nous étudions dans un premier temps les différentes vitesses de gravure de GaN et de AlGaN pour différents plasmas en jouant sur les paramètres suivants : flux des gaz, pression et puissances de la bobine et de la platen. Puis nous analysons l'influence des paramètres des différents plasmas sur la rugosité de la surface des matériaux à l'aide de l'AFM. Ces analyses nous permettent de caractériser très précisément l'évolution de la surface de GaN et de AlGaN. Enfin, nous présentons les recettes les plus pertinentes qui donnent la sélectivité optimale entre GaN et AlGaN.

### 4.1. Présentation des structures

Le nitrure de gallium (GaN) est un semi-conducteur à large bande interdite (3,4 eV) utilisé en optoélectronique et dans les dispositifs de puissance et/ou haute fréquence. C'est un composé binaire (groupe III/groupe V).

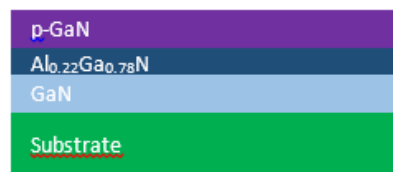
L'expérience menée comporte deux ensembles d'échantillons : une couche de GaN et une hétérostructure  $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}/\text{GaN}$ , tous deux sur substrat de silicium orienté (111) (voir Fig. 12). Sur ces échantillons, une étape de photolithographie est réalisée systématiquement de manière à définir une marche permettant de remonter à la vitesse de gravure. Cette dernière est dissoute après chaque test. La mesure de la marche gravée est réalisée en utilisant un microscope à force atomique (AFM).



**Figure 12:** Schéma des structures utilisées: a) GaN/Si b) Hétérostructure AlGaN/GaN/Si

Une fois les paramètres optimisés, ces derniers sont utilisés pour réaliser une gravure sur une hétérostructure AlGaIn/GaN comportant une couche de cap GaN dopé P de 80nm d'épaisseur (cf. Fig.13)

Une seconde hétérostructure a aussi été utilisée sur laquelle on a vérifié les vitesses de gravure après avoir trouvé une recette optimisée présentant une sélectivité élevée. Ces échantillons ont la structure suivante : pGaIn/Al<sub>0.22</sub>Ga<sub>0.78</sub>N/GaN/Si(111) (cf. Fig.13). Remarquons que ces échantillons sont composés avec des fractions d'aluminium plus faibles que les échantillons précédents. Elle est dans ce cas de 22%. La composition d'aluminium dans les semi-conducteurs AlGaIn joue un rôle majeur puisque cette dernière impose la sélectivité obtenue.



**Figure 13:** Schéma de l'échantillon utilisé pour la gravure de la couche de cap GaN sur HEMT GaN : GaN/AlGaIn/GaN/Si

## 4.2. Expériences et résultats

### 4.2.1. Plan d'expériences

Cette recherche a pour but d'optimiser la gravure de couche nitrures III-N au moyen de différents procédés de gravure sèche. Le choix de la composition de ces procédés permet une meilleure compréhension des mécanismes possibles de la gravure.

Une expérience antérieure de gravure basée sur une chimie Cl<sub>2</sub>/Ar, montre des vitesses de gravure d'une couche de GaN et AlGaIn de 35nm/min et 6nm/min, respectivement. Dans ce cas, Cl<sub>2</sub> est le gaz réactif et l'Ar est un gaz porteur qui peut aider à éliminer les sous-produits de la réaction. Afin d'augmenter la sélectivité entre GaN et AlGaIn, nous avons mis au point un plan d'expérience permettant d'étudier l'impact des paramètres du plasma: puissances inductive et capacitive, débits des gaz et pression de la chambre.

Dans le cas d'un plasma Cl<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>, N<sub>2</sub> est aussi utilisé comme gaz porteur et peut donc remplacer l'argon de l'expérience précédente.

Les autres alternatives à ces expériences sont Cl<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/O<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>/Ar/O<sub>2</sub> et Cl<sub>2</sub>/N<sub>2</sub>/Ar/O<sub>2</sub>.

L'oxygène, dont la réactivité est connue pour oxyder les matériaux et former une couche d'oxyde en surface des III-N, ralentit fortement la vitesse de gravure de ces derniers. Dans le cas

d'une hétérostructure GaN/AlGa<sub>N</sub>, ce procédé peut s'avérer très intéressant pour satisfaire à la sélectivité désirée. En effet, la littérature montre que pour des taux d'oxygène réduit, l'aluminium a tendance à s'oxyder plus vite que le gallium. AlO<sub>x</sub>, formé en surface de AlGa<sub>N</sub>, pourrait constituer une couche d'arrêt à la gravure de GaN sur AlGa<sub>N</sub>.

N°	Puissance coil (W)	Puissance plateau (W)	Pression (mTorr)	Flux Cl <sub>2</sub> (sccm)	Flux Ar (sccm)	Flux N <sub>2</sub> (sccm)	Flux O <sub>2</sub> (sccm)
<b>Test 1</b>	80	20	5	15	5-10-15	-	-
<b>Test 2</b>	80	20	5	15	-	-	5-10-15
<b>Test 3</b>	80	20	5	15	-	5-10-15	-
<b>Test 4</b>	80	20	5	15	5-10	5-10	-
<b>Test 5</b>	80	20	5	15	5-10	-	5-10
<b>Test 6</b>	80	20	5	15	-	5-10	5-10
<b>Test 7</b>	80	20	5	15	5-10	5-10	5-10

**Tableau 2:** Plan d'expériences

## 4.2.2. Analyse des résultats

Dans la première partie du plan d'expérience, nous avons étudié l'influence du flux des gaz dans le plasma : Cl<sub>2</sub>, gaz neutres (N<sub>2</sub> et/ou Ar) et O<sub>2</sub> (voir Tableau 3, test 1 et 2).

Il est admis que le Chlore dans le mélange de gaz est responsable de la gravure chimique tandis que l'Argon est responsable de la décomposition et de l'ionisation du Chlore. L'argon joue aussi un rôle important dans l'élimination efficace des sous-produits de la gravure. Les produits de la gravure non-volatiles qui restent sur la surface, satureront cette dernière et peuvent bloquer la réaction chimique, donc la gravure elle-même. [Rawal.12]

Dans notre cas, les vitesses de gravure de tous les échantillons que cela soit le GaN ou AlGa<sub>N</sub>, diminuent drastiquement avec l'ajout de O<sub>2</sub>. En effet, l'oxygène a tendance à former une couche oxydée en surface qui freine voire qui bloque toute réaction de gravure des matériaux.

La force de liaison entre atomes est l'un des facteurs qui conditionne l'énergie nécessaire pour la briser. C'est un paramètre fortement corrélé à la vitesse de gravure. Étant donné que l'énergie de liaison est de 8.9eV pour Ga-N contre 11.5eV pour Al-N, les vitesses de gravures des ternaires AlGa<sub>N</sub> seront d'autant plus faibles que la fraction d'aluminium du composé y sera

élevé. Il en est de même lorsque les éléments métalliques Ga et Al sont soumis à l'oxydation avec 21,2 eV pour Al-O et 14,7 eV pour Ga-O. En conséquence, la sélectivité des couches III-N soumises à l'oxydation y sera plus élevée [Leed.00].

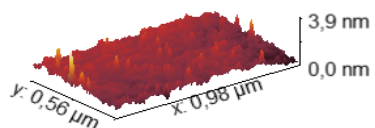
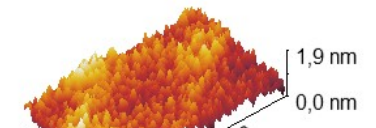
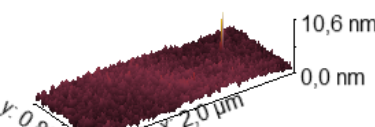

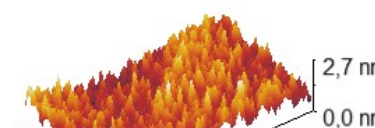

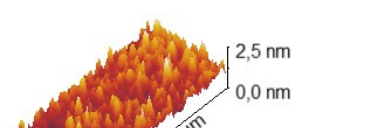


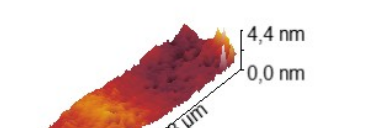
Le Tableau 3 présente les résultats des 3 premiers tests du plan d'expérience.

Après les tests 1 et 2, la meilleure sélectivité est obtenue pour le même débit des gaz Cl<sub>2</sub> et Ar (à 15sccm). Dans ces conditions, la vitesse de gravure de GaN et AlGaIn est de 54nm/mn et 5nm/mn, respectivement soit une sélectivité de 11. Le test 3 nous renseigne sur l'effet de la puissance du platensur les vitesses de gravure. Une sélectivité optimale de 13 est obtenue pour une puissance de 15W, associée à des vitesses de gravure du GaN et de AlGaIn de 33nm/min et 2,5nm/min, respectivement.

Ces expériences révèlent que le fait d'ajouter O<sub>2</sub> dans le plasma diminue fortement la vitesse de gravure de GaN comme mentionné plus haut.

Tests	P coil (W)	P platen (W)	Pression (mTorr)	Cl <sub>2</sub> (sccm)	Ar (sccm)	N <sub>2</sub> (sccm)	O <sub>2</sub> (sccm)	Er GaN (nm/min)	Er AlGaIn (nm/min)	Sélectivité
Test 1	80	20	5	15	5	-	-	35.0	6.0	6
					10	-	-	47.0	5.0	9
					15	-	-	54.0	5.0	11
					20	-	-	47	3	16
Test 2	80	20	5	15	5	-	-	36	6.0	0
					5	-	5	40.0	7.0	6
					10	-	5	7.0	5.0	1
					5	-	10	6,5	3.0	2
Test 3	80	20	5	15	15	-	-	58.0	8,5	7
		15				-	-	33.0	2,5	13
		10				-	-	18.0	2.0	9
		5				-	-	7.0	1.0	7
		0				-	-	1.0	0.0	-

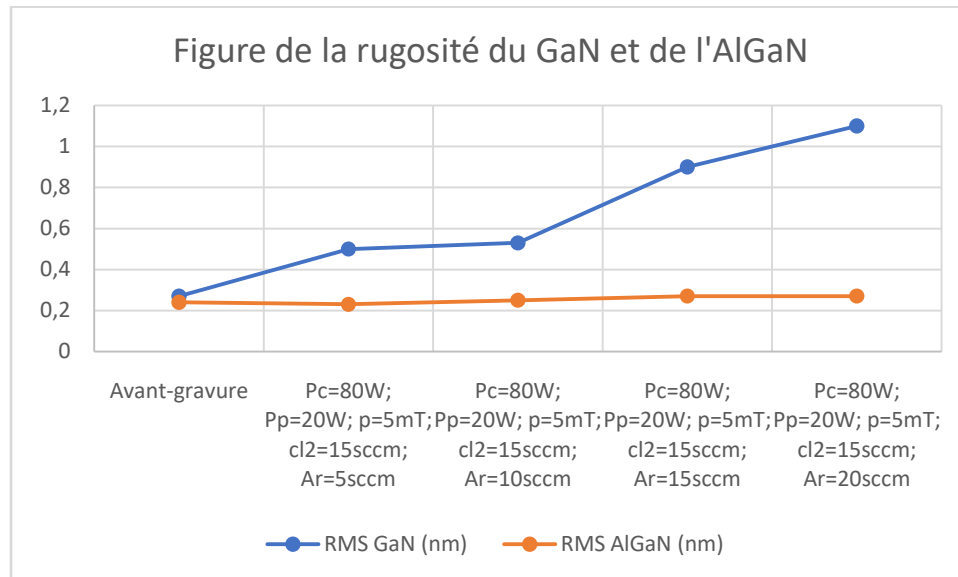
**Tableau 3:** Résultats des trois premiers tests

	GaN	AlGaN
Avant-gravure	 <p>RMS = 0.27nm</p>	 <p>RMS = 0.24nm</p>
Pc=80W; Pp=20W; p=5mT; cl <sub>2</sub> =15sccm; Ar=5sccm	 <p>RMS = 0.5nm</p>	 <p>RMS=0.23nm</p>
Pc=80W; Pp=20W; p=5mT; cl <sub>2</sub> =15sccm; Ar=10sccm	 <p>RMS=0.53nm</p>	 <p>RMS=0.25nm</p>
Pc=80W; Pp=20W; p=5mT; cl <sub>2</sub> =15sccm; Ar=15sccm	 <p>RMS=0.9nm</p>	 <p>RMS=0.27nm</p>
Pc=80W; Pp=20W; p=5mT; cl <sub>2</sub> =15sccm; Ar=20sccm	 <p>RMS=1.1nm</p>	 <p>RMS= 0.27nm</p>

**Tableau 4** : Rugosité de GaN et de AlGaN en fonction du flux d'argon.

Il a été constaté que l'augmentation de la rugosité surfacique observée par AFM suite au test 1, est lié à l'ajout d'un flux d'argon pour le GaN. En effet, comme expliqué auparavant, l'argon sert

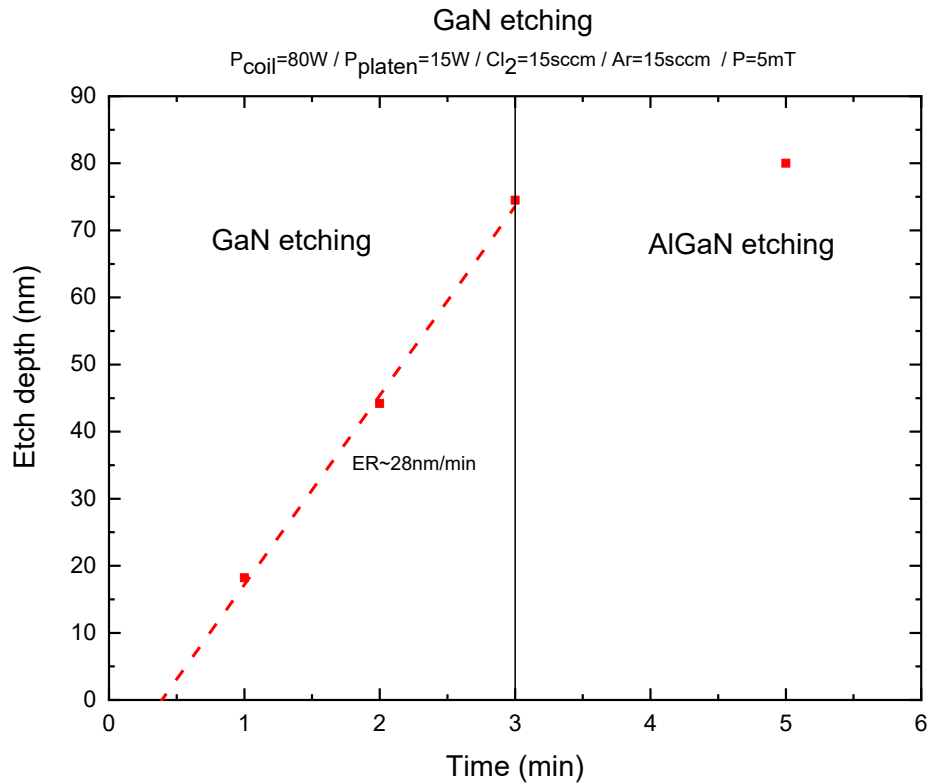
à bombarder la surface ce qui la rend plus rugueuse. Cependant, la rugosité de la surface de AlGa<sub>N</sub> ne change quasiment pas.



Une fois les paramètres optimisés, ces derniers sont utilisés pour réaliser une gravure sur une hétérostructure AlGa<sub>N</sub>/Ga<sub>N</sub> comportant une couche de cap Ga<sub>N</sub> dopé P de 80nm d'épaisseur (cf. Fig.13).

Le temps de gravure choisi est variable de 1 à 5min (voir Fig.3 relatif au test3 du Tableau1).





**Figure 14:** Calibration de la meilleure recette

La Figure14 montre parfaitement la gravure de la couche de pGaN avec une vitesse de 28nm/min par rapport à celle de la couche barrière AlGaN caractérisée par un taux de gravure beaucoup plus faible. L'amorçage de la gravure semble se faire après les 30 premières secondes, probablement causée par la présence d'un oxyde de type  $\text{GaO}_x$ .

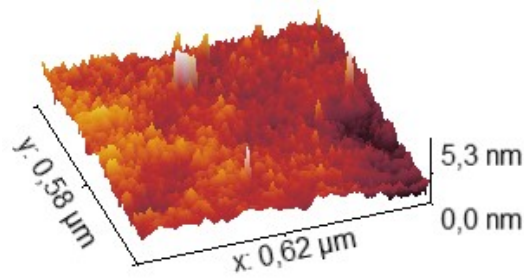
Tests	P coil (W)	P platen (W)	Pression (mTorr)	Cl2 (SCCM)	Ar (SCCM)	N2 (SCCM)	O2 (SCCM)	Er GaN (nm/min)	Er AlGaN (nm/min)	Sélectivité
Test 4	80	15	5	15	15	-	-	36.0	4.0	9
		20			-	5	-	30.0	2.0	15
		20			-	10	-	31.0	3.0	10
		20			-	15	-	35.0	3,4	10
Test 5	80	15	5	15	15	-	-	38.0	5.0	8
		20			-	5	5	1,66	6.0	0
		20			-	10	5	1,66	0.0	-
		20			-	5	10	1,2	0.0	-
Test 6	80	15	5	15	15	-	-	38.0	1.0	38
		20			5	5	-	36.0	3.0	12
		20			10	5	-	42.0	2.8	15
		20			5	10	-	39.0	3.0	13
Test 7	80	15	5	15	15	-	-	40.0	5.0	8
		20			5	5	5	1,65	1,6	1
		20			10	5	5	1,8	1,6	1
		20			5	10	5	1,3	1,66	1

**Tableau 5:** Résultats des quatre tests du plan d'expérience

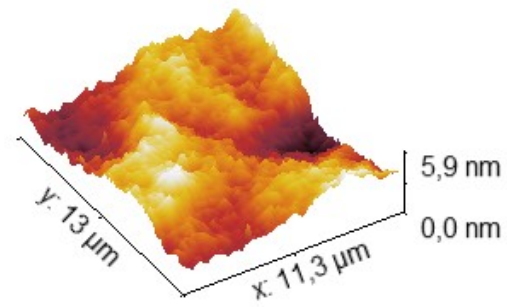
Les tests reportés au tableau 5, réalisés sur des échantillons de GaN et de AlGaN sur substrat de silicium, au moyen du procédé optimisé avec en sus l'azote et/ou l'oxygène dans le mélange gazeux, permettent de fournir quelques conclusions :

- L'utilisation de N<sub>2</sub> dans la phase gazeuse ne modifie pas sensiblement la sélectivité recherchée (cf. test 4).
- Avec le débit minimum disponible avec nos débitmètres, l'ajout de O<sub>2</sub> arrête quasiment la gravure des III-N GaN et AlGaN (cf. test 5 et 7).
- La meilleure sélectivité est obtenue avec un mélange précis d'argon et d'azote, avec un taux maximum de 15 (cf. test 6).

La rugosité de la surface gravée sur les échantillons qui présentent la meilleure sélectivité est de 0.6nm pour GaN et 1.2nm pour AlGaN (cf. figures 15 et 16) sur 1µm<sup>2</sup>.



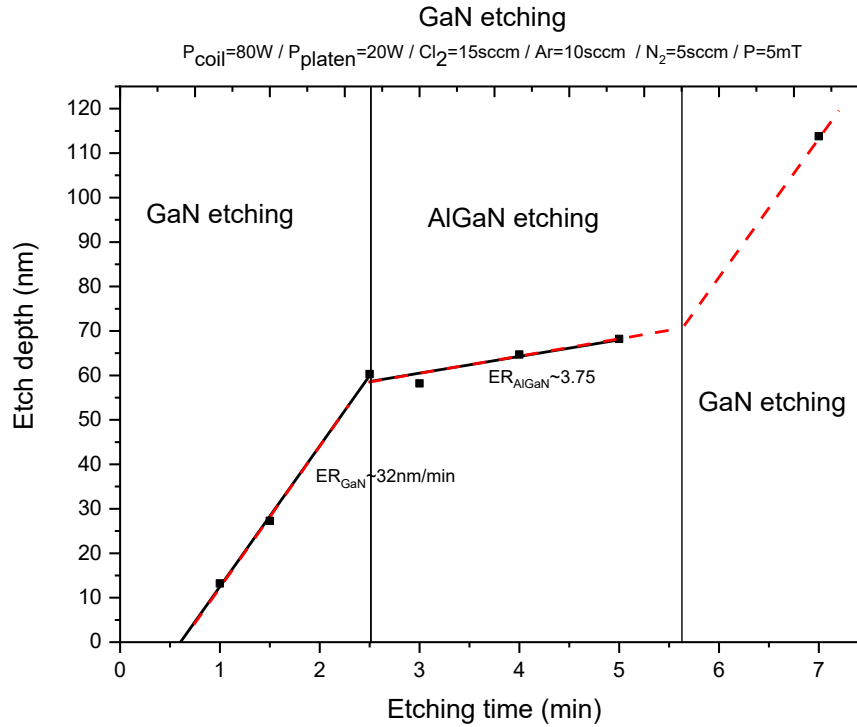
**Figure 15 :** La rugosité RMS du GaN



**Figure 16:** La rugosité RMS de l' $\text{Al}_{0.25}\text{Ga}_{0.75}\text{N}$

Au vu de ces résultats encourageants, ce nouveau procédé optimisé a été utilisé sur une hétérostructure type (cf. Figure 13). La Figure 17 représente les résultats de cette gravure et révèle des taux de gravure relatif à la composition des couches. Nous avons trouvé une vitesse de gravure de 32nm/min pour la couche de cap pGaN et 3.75nm/min pour la couche barrière  $\text{Al}_{0.22}\text{Ga}_{0.78}\text{N}$ , soit une sélectivité de 8.5.

L'écart de sélectivité observé pourrait être attribué au taux d'aluminium de la couche barrière AlGaN moins élevé sur cette hétérostructure que sur les couches de tests. Quant aux difficultés à l'amorçage de la gravure en début de process, il est également attribué à la présence d'une couche oxydée en surface de l'hétérostructure.



**Figure 17:** Calibration de la nouvelle recette optimisée

Après avoir terminé le premier plan de test on a constaté que le mélange  $\text{Cl}_2$ , Ar et  $\text{N}_2$  donne une meilleure sélectivité et on voulait l'optimiser au mieux, pour cela on a opté pour un changement des flux de l'argon et de l'azote (cf. Tableau 6).

Tests	P coil (W)	P platen (W)	Pression (mTorr)	$\text{Cl}_2$ (SCCM)	Ar (SCCM)	$\text{N}_2$ (SCCM)	$\text{O}_2$ (SCCM)	Er GaN (nm/min)	Er AlGaIn (nm/min)	Sélectivité
Test 8	80	20	5	15	15	-	-	38	3	13
					5	5	-	36	3	12
					5	10	-	39	3	13
					10	5	-	36	3	12
					20	5	-	41	3	14
					20	10	-	37	2	19
					20	15	-	31	1,4	22
					20	20	-	30	1,2	25
					20	25	-	30	2	15
					30	5	-	32	3	11
					30	20	-	33,4	3	11
					40	10	-	39	5	8
					40	30	-	32	5	6

**Tableau 6:** Effet des flux de l'argon et l'azote sur la sélectivité

Après rectification de quelques taux de gravure, on peut conclure que le mélange qui optimise au mieux la sélectivité est 15sccm de Cl<sub>2</sub> et 20sccm pour l'Ar et le N<sub>2</sub>. La sélectivité dans ce cas est de 25.

Pour la suite des tests, le flux des gaz est fixé à 15sccm pour le Cl<sub>2</sub> et 20sccm pour l'Ar et le N<sub>2</sub>. Le changement sera donc au niveau de la pression et la puissance du platine.

Aussi, on peut constater après l'ensemble de ces tests que le fait d'augmenter la pression de la chambre permet d'augmenter la sélectivité. En effet, dans ce cas, l'énergie des ions diminue par le fait que leur libre parcours moyen est raccourci à cause des collisions successives, ce qui favorise la gravure chimique et réduit la vitesse de gravure de GaN et de AlGa<sub>N</sub> (cf. Tableau 7). Ce qui peut expliquer la sélectivité record obtenue jusqu'alors (42) sous une pression de 25mT.

Tests	P coil (W)	P platen (W)	Pression (mTorr)	Cl <sub>2</sub> (SCCM)	Ar (SCCM)	N <sub>2</sub> (SCCM)	O <sub>2</sub> (SCCM)	Er GaN (nm/min)	Er AlGa <sub>N</sub> (nm/min)	Sélectivité	Temps de gravure
Test 17	80	20	5	15	20	20	-	32	2	16	5min
			10				-	20	1	20	5min
			15				-	12	0,6	20	5min
			20				-	11	0,4	28	5min
			25				-	12,5	0,3	42	30min
			30				-	13	-	-	30min
			40				-	6,66	0,36	19	30min

**Tableau 7** : Effet de la pression sur la sélectivité

La puissance RF ou puissance du platine est le principal facteur contrôlant l'énergie cinétique des ions. Lorsque celle-ci est réduite, l'énergie cinétique des ions et la vitesse de gravure des III-N l'est aussi (cf. Tableau 8).

Test	P <sub>coil</sub> (W)	P <sub>platen</sub> (W)	Pression (mTorr)	Cl <sub>2</sub> (sccm)	Ar (sccm)	N <sub>2</sub> (sccm)	O <sub>2</sub> (sccm)	Er GaN (nm/min)	Er AlGaIn (nm/min)	Sélectivité	Temps de gravure
Test 20	80	12	25	15	20	20	-	2,4	0,2	12	30min
		16					-	4	0,26	15	30min
		20					-	12,5	0,3	42	30min
		25					-	12	0,5	24	8,8min
		30					-	19,5	0,6	33	10min
		40					-	27	1,1	25	7min

**Tableau 8** : Effet de la puissance du platen sur la sélectivité de gravure des III-N.

# CONCLUSION

Ce manuscrit est une synthèse de travaux sur la gravure des nitrures III-N à large bande interdite. La gravure est une étape délicate dans la fabrication de transistors à base de GaN puisqu'elle impacte les performances de ces derniers (courant, transconductance,  $R_{on}$ , etc...).

L'objectif principal de ce stage de maîtrise en recherche, ~~à~~ consistait en la mise en œuvre d'un Un process de gravure plasma efficace, sélective et reproductible. Le procédé de gravure retenu est réalisé à base de chlore dilué dans un mélange réducteur modulant la réactivité en surface des éléments chlorés. Ce dernier dépend de plusieurs paramètres qui interviennent dans la vitesse de gravure, la rugosité de surface, la sélectivité....

Ce procédé optimisé est alors utilisé pour réaliser un fossé de grille sur la zone active AlGaN d'une hétérostructure HEMT GaN. Ce composant permet alors de quantifier la pertinence du procédé.

Plusieurs expériences ont été testées pour pouvoir améliorer la sélectivité de GaN par rapport à AlGaN. Le premier test avec le mélange  $Ar/Cl_2$  a donné une sélectivité de 13. Le second test avec un mélange  $Ar/Cl_2/N_2$  a donné une sélectivité maximale de 15. Dans ce cas, la rugosité de surface mesurée à l'AFM est de 0.6nm pour le GaN, et 1.2nm pour AlGaN.

L'ajout d'une fraction d'oxygène dans le plasma aussi faible que possible dans nos installations, réduit considérablement les vitesses de gravure des III-N à large bande interdite mais n'a pas permis de trouver une sélectivité telle que recherchée.

Finalement, la sélectivité optimale obtenue est de 42 a été obtenue avec le mélange  $Cl_2/Ar/N_2(15/20/20sccm)$  sous une pression de 25mT, une puissance de platen de 20W et une puissance de la bobine de 80W.

# ANNEXE

## Système de gravure plasma pour III-V



### Rôle de l'appareil

Gravure de composés et hétérostructures III-V et de métaux par plasma à haute densité

### Marque

STS (Surface Technology Systems)

### Modèle

Multiplex Inductively Coupled Plasma (ICP) SR III-V system

### Spécifications techniques

- Température de l'électrode (plateau) : -20 à 70°C
- Source ICP : jusqu'à 1 kW à 13.56 MHz
- Source du plateau : 0-300 W à 13.56 MHz
- Gaz installés sur le système : Ar, N<sub>2</sub>, Cl<sub>2</sub>, He, H<sub>2</sub>, CH<sub>4</sub>, O<sub>2</sub>, SiCl<sub>4</sub>, BCl<sub>3</sub>, SF<sub>6</sub>
- Taille d'échantillons : substrats jusqu'à 200 mm de diamètre; possibilité de travailler avec de petits échantillons
- Système optique de suivi de la gravure en temps réel (end point detection).
- Spectromètre optique (détection des espèces présentes)



## Exemples de procédés disponibles

- Gravure de structure "ridge" pour lasers à hétérostructure.
- Gravure de chrome pour fabrication de photomasques.
- Gravure de matériaux III-V, Ge, Si, GaN, diamant, métaux

## Système de gravure plasma pour Silicium(ASE)



## Rôle de l'appareil

Gravure de silicium par plasma à haute densité ou gravure au  $\text{XeF}_2$

## Marque

STS (Surface Technology Systems)

## Modèle

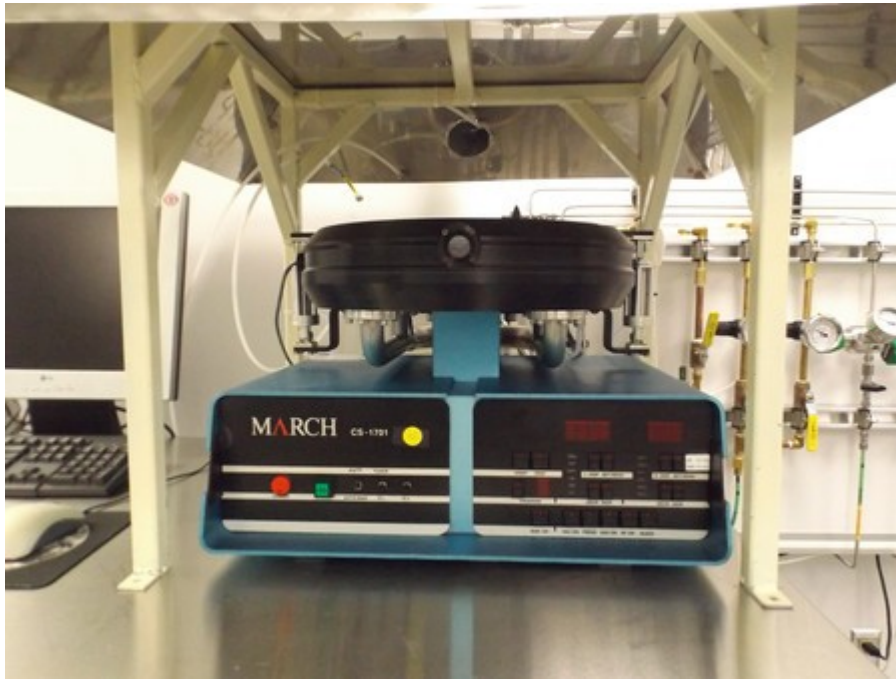
Multiplex Advanced Silicon Etch (ASE-SR) ICP system

## Spécifications techniques

- Température de l'électrode (plateau) : 5 à 40°C
- Source ICP : jusqu'à 1 kW à 13.56 MHz
- Source du plateau : 0-300 W à 13.56 MHz, ou 0-300 W @ 380 kHz
- Gaz de procédés installés sur le système : Ar,  $\text{SF}_6$ ,  $\text{C}_4\text{F}_8$ ,  $\text{O}_2$
- Taille d'échantillons : substrats jusqu'à 100 mm de diamètre; possibilité de travailler avec de petits échantillons

**Exemples de procédés disponibles**

- Gravure de Si et de Ge.
- Gravures profondes pour MEMS
- Gravures par procédé Bosch (alternance d'étapes de gravure et passivation)
- Gravure par procédé semi-Bosch
- Gravures de SOI
- Gravure isotropique de Si

**Appareil de gravure plasma RIE****Rôle de l'appareil**

Gravure par plasma

**Marque**

March

**Modèle**

CS-1701

**Spécifications techniques**

- Taille substrat jusqu'à 200mm
- 4 gaz disponibles :  $\text{SF}_6$ ,  $\text{O}_2$ ,  $\text{CF}_4$ ,  $\text{H}_2/\text{N}_2$
- Puissance RF 600W maximum

- Contrôlé par ordinateur
- Recettes sous formes de fichier
- Possibilité de contrôler la pression

#### **Exemples de procédés disponibles**

- Gravure de silicium
- Gravure de  $\text{SiO}_2$
- Gravure de  $\text{Si}_3\text{N}_4$
- Gravure de polyimide et autres matériau
- Nettoyage à l'oxygène
- Modification de l'état de surface (adhésion, mouillage, etc.)
- Traitement au  $\text{H}_2/\text{N}_2$  (*forming gas*)

# LISTE DES RÉFÉRENCES

<b>[Adesida93]</b>	I. Adesida, A. Mahajan, E. Andideh, M. Asif Khan, D.T. Olsen, J.N. Kuznia, Appl. Phys. Lett. 63, p.2777 (1993)
<b>[Adesida03]</b>	I. Adesida, V. Kumar, J.W. Yang, M.A. Khan, présenté à TWHM (Okinawa, Japan, 21-24 janv 2003)
<b>[Anderson06]</b>	T.J. Anderson, F. Ren, L. Voss, M. Hlad, B.P. Gila, L. Covert, J. Lin, S.J. Pearton, P. Bove, H. Lahreche, J. Thuret, J. Vac. Sci. Technol. B 24(5), p.2302 (2006)
<b>[Ando03]</b>	Y. Ando, Y. Okamoto, K. Hataya, T. Nakayama, H. Miyamoto, T. Inoue, M. Kuzuhara, IEDM Tech. Dig. P.563 (2003)
<b>[Arulkumaran05]</b>	S. Arulkumaran, T. Egawa, H. Ishikawa, Jap. J. Appl. Phys. 44(5A), p.2953 (2005)
<b>[Arulkumaran06]</b>	S. Arulkumaran, T. Egawa, L. Selvaraj, H. Ishikawa, Jap. J. Appl. Phys. 45(8), p.L220 (2006)
<b>[Buttari02a]</b>	D. Buttari, A. Chini, G. Meneghesso, E. Zanoni, P. Chavarkar, R. Coffie, N.Q. Zhang, S. Heikman, L. Shen, H. Xing, C. Zheng, U.K. Mishra, IEEE Electron Device Letters 23(3), p.118 (2002)
<b>[Buttari02b]</b>	D. Buttari, S. Heikman, S. Keller, U.K. Mishra, IEEE conference 0-7803-7478, p.461 (2002)
<b>[Buttari03]</b>	D. Buttari, A. Chini, T. Palacios, R. Coffie, L. Shen, H. Xing, S. Heikman, L. McCarthy, A. Chakraborty, S. Keller, U.K. Mishra, Appl. Phys. Lett. 83(23), p.4779 (2003)
<b>[Burm97]</b>	J. Burm, W.J. Schaff, G.H. Martin, L.F. Eastman, H. Amano, I. Akasaki, Solid-State Elec. 41(2), p.247 (1997)
<b>[Burnham10]</b>	S. D. Burnham <i>et al.</i> , « Gate-recessed normally-off GaN-on- Si HEMT using a new O2-BCl3 digital etching technique », <i>Phys. Status Solidi C</i> , vol. 7, n° 7-8, p. 2010-2012, juill. 2010.
<b>[Cai05]</b>	Y. Cai, Y. Zhou, K.J. Chen, K.M. Lau, IEEE Electron Device Letters 26(7), p.435 (2005)
<b>[Cao99]</b>	X.A. Cao, H. Cho, S.J. Pearton, G.T. Dang, A.P. Zhang, F. Ren, R.J. Shul, L. Zhang, R. Hickman, J.M. Van Hove, Appl. Phys. Lett. 75(2), p.232 (1999)
<b>[Cao00a]</b>	X.A. Cao, A.P. Zhang, G.T. Dang, F. Ren, S.J. Pearton, R.J. Shul, L. Zhang, J. Vac. Sci. Technol. A 18(4), p.1144 (2000)
<b>[Cao00b]</b>	X.A. Cao, S.J. Pearton, G.T. Dang, A.P. Zhang, F. Ren, J.M. Van Hove, IEEE Trans. Elec. Devices 47(7), p.1320 (2000)
<b>[Cao00c]</b>	X.A. Cao, S.J. Pearton, G.T. Dang, A.P. Zhang, F. Ren, R.J. Shul, L. Zhang, R. Hickman, J.M. Van Hove, MRS Internet Journal of Nitride Semiconductor Research (2000) (nsr.mij.mrs.org)
<b>[Chen99]</b>	C.-H. Chen, S. Keller, E.D. Haberer, L. Zhang, S.P. DenBaars, E.L. Hu, K. Mishra, Y. Wu, J. Vac. Sci. Technol. B 17(6), p.2755 (1999)
<b>[Chen03]</b>	Z.Z. Chen, Z.X. Qin, Y.Z. Tong, X.M. Ding, X.D. Hu, T.J. Yu, Z.J. Yang, G.Y. Zhang, Physica B 334, p.188 (2003)
<b>[Cheung03]</b>	R. Cheung, B. Rong, E. van der Drift, W.G. Sloof, J. Vac. Sci. Technol. B 21(4), p.1268 (2003)
<b>[Chini04]</b>	A. Chini, D. Buttari, R. Coffie, L. Shen, S. Heikman, A. Chakraborty, S. Keller, U.K. Mishra, IEEE Electron Device Lett. 25(5), p.229 (2004)
<b>[Cho98a]</b>	H. Cho, J. Hong, T. Maeda, S.M. Donovan, J.D. MacKenzie, C.R. Abernathy, MRS Internet J.Nitride Semicond. Res. 3, p.5 (1998)
<b>[Cho98b]</b>	H. Cho, C.B. Vartuli, S.M. Donovan, C.R. Abernathy, S.J. Pearton, R.J. Shul, C.

	Constantine, J. Vac. Sci. Technol. A 16(3), p.1631 (1998)
<b>[Coquillat98]</b>	D. Coquillat, S.K. Murad, A. Ribayrol, C.J.M. Smith, R.M. De La Rue, C.D.W. Wilkinson, O. Briot, R.L. Aulombard, Mat. Sci. Forum 264-268 (2), p.1403 (1998)
<b>[Douglas16]</b>	E. A. Douglas, C. A. Sanchez, R. J. Kaplar, A. A. Allerman, et A. G. Baca, « Inductively coupled BCl <sub>3</sub> /Cl <sub>2</sub> /Ar plasma etching of Al-rich AlGaN », <i>J. Vac. Sci. Technol. Vac. Surf. Films</i> , vol. 35, n° 2, p. 021305, déc. 2016.
<b>[Egawa00]</b>	T. Egawa, H. Ishikawa, M. Umeno, T. Jimbo, Appl. Phys. Lett. 76(1), p.121 (2000)
<b>[Egawa01]</b>	T. Egawa, G.-Y. Zhao, H. Ishikawa, M. Umeno, T. Jimbo, IEEE Trans. Elec. Devices 48(3), p.603 (2001)
<b>[Egorkin17]</b>	V. Egorkin, A. Zaitsev, V. Garmash, O. Zagidullina, et A. Negencev, « Digital circuits based on GaN HEMTs with threshold voltage adjusted by fluorine plasma treatment », in <i>2017 IEEE Conference of Russian Young Researchers in Electrical and Electronic Engineering (EIConRus)</i> , 2017, p. 1131-1134
<b>[Fan96]</b>	Z. Fan, S.N. Mohammad, W. Kim, O. Aktas, A.E. Botchkarev, H. Morkoc, Appl. Phys. Lett. 68(12), p.1672 (1996)
<b>[Fareed05]</b>	R.S. Qhalid Fareed, X. Hu, A. Tarakji, J. Deng, R. Gaska, M. Shur, M.A. Khan, Appl. Phys. Lett. 86, 143512 (2005)
<b>[Feng96]</b>	M.S. Feng, J.D. Guo, Y.M. Lu, E.Y. Chang, Mat. Chem. Phys. 45, p.80 (1996)
<b>[Gillis96a]</b>	H.P. Gillis, D.A. Choutov, K.P. Martin, L. Song, Appl. Phys. Lett. 68, p.2255 (1996)
<b>[Gillis96b]</b>	H.P. Gillis, D.A. Choutov, K.P. Martin, S.J. Pearton, C.R. Abernathy, J. Electrochem. Soc. 143, p.251 (1996)
<b>[Greco17]</b>	G. Greco, F. Iucolano, et F. Roccaforte, « Review of technology for normally-off HEMTs with p-GaN gate », <i>Mater. Sci. Semicond. Process.</i> , oct. 2017.
<b>[Haedy17]</b>	M. T. Hardy, B. P. Downey, D. J. Meyer, N. Nepal, D. F. Storm, et D. S. Katzer, « Epitaxial ScAlN Etch-Stop Layers Grown by Molecular Beam Epitaxy for Selective Etching of AlN and GaN », <i>IEEE Trans. Semicond. Manuf.</i> , vol. 30, n° 4, p. 475-479, nov. 2017.
<b>[Hahn99]</b>	Y.B. Hahn, D.C. Hays, S.M. Donovan, C.R. Abernathy, J. Han, R.J. Shul, H. Cho, K.B. Jung, S.J. Pearton, J. Vac. Sci. Technol. A 17(3), p.768 (1999)
<b>[Han03]</b>	Y.-J. Han, S. Xue, W.-P. Guo, C.-Z. Sun, Z.-B. Hao, Y. Luo, Jpn. J. Appl. Phys. 42, part 1, n°10, p.6409 (2003)
<b>[Han03b]</b>	Y. Han, S. Xue, W. Guo, Y. Luo, Z. Hao, C. Sun, , Jpn. J. Appl. Phys. 42, part 2, n°10A, p.L1139 (2003)
<b>[Hasegawa03]</b>	H. Hasegawa, T. Muranaka, S. Kasai, T. Hashizume, Jpn. J. Appl. Phys. 42, p.2375 (2003)
<b>[Hemmi17]</b>	« Neutral beam process in AlGaIn/GaN HEMTs: Impact on current collapse - ScienceDirect ». [En ligne]. Disponible sur: <a href="https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038110117305154">https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0038110117305154</a> . [Consulté le: 13-déc-2017]
<b>[Huang04]</b>	K.-C. Huang, W.-H. Lan, K.F. Huang, Jpn. J. Appl. Phys. 43(1), p.82 (2004)
<b>[Jia06]</b>	S. Jia, Y. Cai, D. Wang, B. Zhang, K.M. Lau, K.J. Chen, Phys. Stat. Sol. (c)3, n°6, p.2368 (2006)
<b>[Jin02]</b>	Z. Jin, T. Hashizume, H. Hasegawa, Appl. Surf. Sci. 190, p.361 (2002)
<b>[Kaupp17]</b>	C. Kauppinen <i>et al.</i> , « Atomic layer etching of gallium nitride (0001) », <i>J. Vac. Sci. Technol. Vac. Surf. Films</i> , vol. 35, n° 6, p. 060603, août 2017.
<b>[Kim99]</b>	H.S. Kim , G.Y. Yeom, J.W. Lee, T.I. Kim, Thin Solid Films 341, p.180 (1999)
<b>[Kent01a]</b>	D.G. Kent, K.P. Lee, A.P. Zhang, B. Luo, M.E. Overberg, C.R. Abernathy, F. Ren, K.D.

	Mackenzie, S.J. Pearton, Y. Nakagawa, Solid State Electronics 45, p.467 (2001)
[Kent01b]	D.G. Kent, K.P. Lee, A.P. Zhang, B. Luo, M.E. Overberg, C.R. Abernathy, F. Ren, K.D. Mackenzie, S.J. Pearton, Y. Nakagawa, Solid State Electronics 45, p.1837 (2001)
[Khan01]	F.A. Khan, L. Zhou, V. Kumar, I. Adesida, J. Vac. Sci. Technol. B 19(6), p.2926 (2001)
[Khan02]	F.A. Khan, V. Kumar, I. Adesida, Electrochem. Solid-State Lett. 5(2), G8 (2002)
[Kuliev02]	A. Kuliev, V. Kumar, R. Schwindt, D. Selvanathan, A.M. Dabiran, P. Chow, I. Adesida, IEEE p.428 (2002)
[Kuliev03]	A. Kuliev, V. Kumar, R. Schwindt, D. Selvanathan, A.M. Dabiran, P. Chow, I. Adesida, Solid-State Electronics 47, p.117 (2003)
[Kuzmik02]	J. Kuzmik, P. Javorka, M. Marso, P. Kordos, Semicond. Sci. Technol. 17, L76 (2002)
[Lan06]	W.-H. Lan, K.-C. Huang, K.F. Huang, Solid State Elec. 50, p.1677 (2006)
[Lee95]	H. Lee, D.B. Oberman, J.S. Harris, Appl. Phys. Lett. 67, p.1754 (1995)
[Lee98]	Y.H. Lee, H.S. Kim, G.Y. Yeom, J.W. Lee, M.C. Yoo, T.I. Kim, J. Vac. Sci. Technol. A 16(3), p.1478 (1998)
[Lee00a]	W.S. Lee, Y.H. Choi, K.W. Chung, D.C. Moon, M.W. Shin, Electron. Lett. 36, p.265 (2000)
[Lee00b]	J.-M. Lee, K.-M. Chang, S.-J. Park, J. Korean Phys. Soc. 37(6), p.842 (2000)
[Lee00c]	J.-M. Lee, K.-M. Chang, S.-W. Kim, C. Huh, I.-H. Lee, S.-J. Park, J. Appl. Phys. 87(11), p.7667 (2000)
[Lee00d]	[1] J.-M. Lee, K.-M. Chang, I.-H. Lee, et S.-J. Park, « Highly selective dry etching of III nitrides using an inductively coupled Cl <sub>2</sub> /Ar/O <sub>2</sub> plasma », <i>J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanometer Struct. Process. Meas. Phenom.</i> , vol. 18, n° 3, p. 1409-1411, mai 2000
[Lee02]	C. Lee, W. Lu, E. Piner, I. Adesida, Solid-State Electronics 46, p.743 (2002)
[Lin94]	M.E. Lin, Z.F. Fan, Z. Ma, L.H. Allen, H. Morkoc, Appl. Phys. Lett. 64, p.887 (1994)
[Maeda99]	T. Maeda, J.W. Lee, R.J. Shul, J. Han, J. Hong, E.S. Lambers, S.J. Pearton, C.R. Abernathy, W.S. Hobson, Appl. Surf. Sci. 143, p.174 (1999)
[McLane95]	G.F. McLane, L. Casas, S.J. Pearton, C.R. Abernathy, Appl. Phys. Lett. 66, p.3328 (1995)
[Michael07]	M. L. Schuette et W. Lu, « Highly selective zero-bias plasma etching of GaN over AlGaIn », <i>J. Vac. Sci. Technol. B Microelectron. Nanometer Struct. Process. Meas. Phenom.</i> , vol. 25, n° 6, p. 1870-1874, nov. 2007.
[Minsky96]	M.S. Minsky, M. White, E.L. Hu, Appl. Phys. Lett. 68, p.1531 (1996)
[Molnar95]	B. Molnar, C.R. Eddy, Jr., and K. Doverspike, J. Appl. Phys. 78(10), p.6132 (1995)
[Moon05]	J.S. Moon, S. Wu, D. Wong, I. Milosavljevic, A. Conway, P. Hashimoto, M. Hu, M. Antcliffe, M. Micovic, IEEE Elec. Dev. Lett. 0741-3106, p.1 (2005)
[Nakamura06a]	S. Nakamura, M. Suda, M. Suhara, T. Okumura, CS MANTECH Conference, April 24-27, Vancouver, Canada, p.273 (2006)
[Nakamura06b]	S. Nakamura, M. Suda, M. Suhara, T. Okumura, CS MANTECH Conference, April 24-27, Vancouver, Canada, p.109 (2006)
[Nakayama06]	T. Nakayama, Y. Ando, Y. Okamoto, T. Inoue, H. Miyamoto, Electron. Lett. 42(8), 13 avril (2006)
[Oh04]	C.S. Oh, T.H. Kim, K.Y. Lim, J.W. Yang, Semicond. Sci. Technol. 19, p.172 (2004)
[Ohba17]	T. Ohba, W. Yang, S. Tan, K. J. Kanarik, et K. Nojiri, « Atomic layer etching of GaN and AlGaIn using directional plasma-enhanced approach », <i>Jpn. J. Appl. Phys.</i> , vol. 56, n° 6S2, p. 06HB06, mai 2017
[Okamoto04a]	Y. Okamoto, Y. Ando, T. Nakayama, K. Hataya, H. Miyamoto, T. Inoue, M. Senda, K.



	Hirata, M. Kosaki, N. Shibata, M. Kuzuhara, IEEE Trans. Elec. Devices 51(12), p.2217 (2004)
<b>[Okamoto04b]</b>	Y. Okamoto, Y. Ando, K. Hataya, T. Nakayama, H. Miyamoto, T. Inoue, M. Senda, K. Hirata, M. Kosaki, N. Shibata, M. Kuzuhara, IEEE MTT-S Digest (TH3A-2), p.1351 (2004)
<b>[Okamoto04c]</b>	Y. Okamoto, Y. Ando, K. Hataya, T. Nakayama, H. Miyamoto, T. Inoue, M. Senda, K. Hirata, M. Kosaki, N. Shibata, M. Kuzuhara, Electron. Lett. 40(10), (13 mai 2004)
<b>[Okamoto04d]</b>	Y. Okamoto, Y. Ando, K. Hataya, T. Nakayama, H. Miyamoto, T. Inoue, M. Senda, K. Hirata, M. Kosaki, N. Shibata, M. Kuzuhara, IEEE Trans. Microwave Theory and Techniques 52(11), p.2536 (nov 2004)
<b>[Okita03]</b>	H. Okita, K. Kaifu, J. Mita, T. Yamada, Y. Sano, H. Ishikawa, T. Egawa, T. Jimbo, Phys. Stat. Sol. (a) 200, n°1, p.187 (2003)
<b>[Palacios05]</b>	T. Palacios, A. Chakraborty, S. Rajan, C. Poblenz, S. Keller, S.P. DenBaars, J.S. Speck, U.K. Mishra, IEEE Electron Device Letters 26(11), p.781 (2005)
<b>[Palacios06a]</b>	T. Palacios, L. Shen, S. Keller, A. Chakraborty, S. Heikman, S.P. DenBaars, U.K. Mishra, Appl. Phys. Lett. 89, 073508 (2006)
<b>[Palacios06b]</b>	T. Palacios, S. Rajan, L. Shen, A. Chakraborty, S. Keller, S.P. DenBaars, U.K. Mishra, ECS meeting abstracts (2006)
<b>[Pankove72]</b>	J. Pankove, J. Electrochem. Soc. 119, p.1118 (1972)
<b>[Pearnton93a]</b>	S.J. Pearnton, C.R. Abernathy, F. Ren, J.R. Lothian, P.W. Wisk, A. Katz, C. Constantine, Semicond. Sci. Technol. 8, p.310 (1993)
<b>[Pearnton93b]</b>	S.J. Pearnton, C.R. Abernathy, F. Ren, J.R. Lothian, P.W. Wisk, A. Katz, J. Vac. Sci. Technol. A 11(4), p.1772 (1993)
<b>[Pearnton94]</b>	S.J. Pearnton, C.R. Abernathy, F. Ren, Appl. Phys. Lett. 64, p.2294 (1994)
<b>[Pearnton99]</b>	S.J. Pearnton, J.C. Zolper, R.J. Shul, F. Ren, J. Appl. Phys. 86(1), p.1 (1999)
<b>[Pearnton00]</b>	S.J. Pearnton, F. Ren, A.P. Zhang, K.P. Lee, Mat. Sci. Eng. 250, p.1 (2000)
<b>[Ping94]</b>	A.T. Ping, I. Adesida, M. Asif Khan, J.N. Kuznia, Electron. Lett. 30, p.1895 (1994)
<b>[Ping95]</b>	A.T. Ping, I. Adesida, M. Asif Khan, Appl. Phys. Lett. 67, p.1250 (1995)
<b>[Ping99]</b>	A.T. Ping, D. Selvanathan, C. Youtsey, E. Piner, J. Redwing, I. Adesida, Electron. Lett. 35, p.2140 (1999)
<b>[Rawal]</b>	D. S. Rawal <i>et al.</i> , « GaN etch rate and surface roughness evolution in Cl <sub>2</sub> /Ar based inductively coupled plasma etching », <i>Thin Solid Films</i> , vol. 520, n° 24, p. 7212-7218, oct. 2012
<b>[Qin03]</b>	Z.X. Qin, Z.Z. Chen, H.X. Zhang, X.M. Ding, X.D. Hu, T.J. Yu, Y.Z. Tong, G.Y. Zhang, Mat. Sci. Semicond. Proc. 5, p.473 (2003)
<b>[Ren97]</b>	F. Ren, J.R. Lothian, Y.K. Chen, R.F. Karlicek Jr., L. Tran, M. Schurmann, J.W. Lee, S.J. Pearnton, Solid-State Electronics 41(11), p.1819 (1997)
<b>[Ribayrol99]</b>	A. Ribayrol, D. Coquillat, R.M. De La Rue, S.K. Murad, C.D.W. Wilkinson, P. Girard, O. Briot, R.L. Aulombard, Mat. Sci. Eng. B59, p.335 (1999)
<b>[Rosli11]</b>	R. Hao <i>et al.</i> , « Normally-off p-GaN/AlGaN/GaN high electron mobility transistors using hydrogen plasma treatment », <i>Appl. Phys. Lett.</i> , vol. 109, n° 15, p. 152106, oct. 2016.
<b>[Saito06]</b>	W. Saito, Y. Takada, M. Kuraguchi, K. Tsuda, I. Omura, IEEE Trans. Elec. Devices 53(2), p.356 (2006)
<b>[Shen06]</b>	L. Shen, T. Palacios, C. Poblenz, A. Corrión, A. Chakraborty, N. Fichtenbaum, S. Keller, S.P. Denbaars, J.S. Speck, U.K. Mishra, IEEE Electron Device Letters 27(4), p.214 (2006)

<b>[Shul96a]</b>	R.J. Shul, G.B. McClellan, S.J. Pearton, C.R. Abernathy, C. Constantine, C. Baratt, <i>Electron. Lett.</i> 32, p.1408 (1996)
<b>[Shul96b]</b>	R.J. Shul, G.B. McClellan, S.A. Casalnuovo, D.J. Rieger, S.J. Pearton, C. Constantine, C. Baratt, R.F. Karlicek, C. Tran, M. Schurman, <i>Appl. Phys. Lett.</i> 69, p.1119 (1996)
<b>[Shul97]</b>	R.J. Shul, M.M. Bridges, J. Han, S.J. Pearton, J.W. Lee, C.B. Vartuli, P. Killeen, M.J. Ludowise, Spring meeting of Mat. Res. Soc. (1997)
<b>[Shul98a]</b>	R.J. Shul, C.G. Willison, M.M. Bridges, J. Han, J.W. Lee, S.J. Pearton, C.R. Abernathy, J.D. MacKenzie, S.M. Donovan, L. Zhang, L.F. Lester, <i>J. Vac. Sci. Technol. A</i> 16(3), p.1621 (1998)
<b>[Shul98b]</b>	R.J. Shul, C.G. Willison, M.M. Bridges, J. Han, J.W. Lee, S.J. Pearton, C.R. Abernathy, J.D. MacKenzie, S.M. Donovan, <i>Solid-State Elec.</i> 42(12), p.2269 (1998)
<b>[Shul00]</b>	R.J. Shul, L. Zhang, A.G. Baca, C.G. Willison, J. Han, S.J. Pearton, F. Ren, <i>J. Vac. Sci. Technol. A</i> 18(4), p.1139 (2000)
<b>[Skriniarova02]</b>	J. Skriniaarova, A. van der Hart, H.P. Bochem, A. Fox, P. Kordos, <i>Mat. Sci. Eng.</i> B91-92, p.298 (2002)
<b>[Smith00]</b>	S. A. Smith, W. V. Lampert, P. Rajagopal, A. D. Banks, D. Thomson, et R. F. Davis, « Selective etching of GaN over AlN using an inductively coupled plasma and an O <sub>2</sub> /Cl <sub>2</sub> /Ar chemistry », <i>J. Vac. Sci. Technol. Vac. Surf. Films</i> , vol. 18, n° 3, p. 879-881, mai 2000.
<b>[Sun06]</b>	Y. Sun, L.F. Eastman, <i>J. Vac. Sci. Technol. B</i> 24(6), p.2723 (2006)
<b>[Vartuli96a]</b>	C.B. Vartuli, S.J. Pearton, J.W. Lee, C.R. Abernathy, J.D. MacKenzie, J.C. Zolper, R.J. Shul, F. Ren, <i>J. Electrochem. Soc.</i> 143, p.3681 (1996)
<b>[Vartuli96b]</b>	C.B. Vartuli, J.D. MacKenzie, J.W. Lee, C.R. Abernathy, S.J. Pearton, R.J. Shul, <i>J. Appl. Phys.</i> 80 (7), p.3705 (1996)
<b>[Vartuli96c]</b>	C.B. Vartuli, S.J. Pearton, C.R. Abernathy, J.D. MacKenzie, E.S. Lambers, J.C. Zolper, <i>J. Vac. Sci. Technol. B</i> 14(6), p.3523 (1996)
<b>[Vartuli97a]</b>	C.B. Vartuli, S.J. Pearton, J.W. Lee, J.D. MacKenzie, C.R. Abernathy, R.J. Shul, <i>J. Vac. Sci. Technol. A</i> 15, p.638 (1997)
<b>[Vartuli97b]</b>	C.B. Vartuli, S.J. Pearton, J.W. Lee, J.D. MacKenzie, C.R. Abernathy, R.J. Shul, C. Constantine, C. Barrat, <i>J. Electrochem. Soc.</i> 144, p.2844 (1997)
<b>[Waki06]</b>	I. Waki, M. Iza, J.S. Speck, S.P. DenBaars, S. Nakamura, <i>Jap. J. Appl. Phys.</i> 45(2A), p.720 (2006)
<b>[Wang04]</b>	W.-K. Wang, Y.-J. Li, C.-K. Lin, Y.-J. Chan, G.-T. Chan, J.-I. Chyi, <i>IEEE Elec. Dev. Lett.</i> 25(2), p.52 (2004)
<b>[Wang05]</b>	W.-K. Wang, P.-C. Lin, C.-H. Lin, C.-K. Lin, Y.-J. Chan, G.-T. Chen, J.-I. Chyi, <i>IEEE Elec. Dev. Lett.</i> 26(1), p.5 (2005)
<b>[Yoshida97]</b>	S. Yoshida, <i>J. Crystal Growth</i> 181, p.293 (1997)
<b>[Youtsey98]</b>	C. Youtsey, I. Adesida, L.T. Romano, G. Bulman, <i>Appl. Phys. Lett.</i> 72, p.560 (1998)
<b>[Zhirnov05]</b>	E. Zhirnov, S. Stepanov, A. Gott, W.N. Wang, Y.G. Shreter, D.V. Tarkhin, N.I. Bochkareva, <i>J. Vac. Sci. Technol. A</i> 23(4), p.687 (2005)
<b>[Zhong17]</b>	Y. Zhong <i>et al.</i> , « Self-terminated etching of GaN with a high selectivity over AlGaIn under inductively coupled Cl <sub>2</sub> /N <sub>2</sub> /O <sub>2</sub> plasma with a low-energy ion bombardment », <i>Appl. Surf. Sci.</i> , vol. 420, n° Supplement C, p. 817-824, oct. 2017.
<b>[Zhou17]</b>	« p-GaN Gate Enhancement-Mode HEMT Through a High Tolerance Self-Terminated Etching Process - IEEE Journals & Magazine ». [En ligne]. Disponible sur: <a href="http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7973151/?reload=true">http://ieeexplore.ieee.org/abstract/document/7973151/?reload=true</a> . [Consulté le: 13-déc-2017].



